ТОМ 24, №4, 2024 eISSN 2687-1653
РЕЦЕНЗИРУЕМЫЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)

Механика / Mechanics

Машиностроение и машиноведение / Machine Buiding and Machine Science

Информатика, вычислительная техника и управление / Information Technology, Computer Science and Management



www.vestnik-donstu.ru
DOI 10.23947/2687-1653



Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)

Рецензируемый научно-практический журнал

eISSN 2687–1653

Издается с 2000 года

Периодичность – 4 выпуска в год

DOI: 10.23947/2687–1653

Учредитель и издатель — Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донской государственный технический университет» (ДГТУ), г. Ростов-на-Дону

Создан в целях информирования читательской аудитории о новейших достижениях и перспективах в области механики, машиностроения, информатики и вычислительной техники. Издание является форумом для сотрудничества российских и иностранных ученых, способствует сближению российского и мирового научно-информационного пространства.

Журнал включен в перечень рецензируемых научных изданий, в котором должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (Перечень ВАК) по следующим научным специальностям:

1.1.7 – Теоретическая механика, динамика машин (технические науки)
1.1.8 – Механика деформируемого твердого тела (технические, физико-математические науки)
1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы (технические науки)
1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки)
2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации, статистика (технические науки)
2.3.3 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки)
2.3.5 – Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей (технические науки)
2.3.7 – Компьютерное моделирование и автоматизация проектирования (технические, физико-математические науки)
2.3.8 – Информатика и информационные процессы (технические науки)
2.5.2 – Машиноведение (технические науки)
2.5.3 – Трение и износ в машинах (технические науки)
2.5.5 – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки (технические науки)
2.5.6 – Технология машиностроения (технические науки)
2.5.8 – Сварка, родственные процессы и технологии (технические науки)
2.5.9 – Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды (технические науки)
2.5.10 – Гидравлические машины, вакуумная, компрессорная техника, гидро- и пневмосистемы (технические науки)

Регистрация:	Выписка из реестра зарегистрированных средств массовой информации ЭЛ № ФС 77 – 78854 от 07 августа 2020 г., выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций
Индексация и архивация:	РИНЦ, CyberLeninka, CrossRef, Dimensions, DOAJ, EBSCO, Index Copernicus, Internet Archive, Google Scholar
Сайт:	http://vestnik-donstu.ru
Адрес редакции:	344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1
E-mail	vestnik@donstu.ru
Телефон	+7 (863) 2–738–372
Дата выхода №4,2024 в свет	30.12.2024





Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)

Peer-reviewed scientific and practical journal

eISSN 2687–1653

Published since 2000

Periodicity – 4 issues per year

DOI: 10.23947/2687–1653

Founder and Publisher — Don State Technical University (DSTU), Rostov-on-Don, Russian Federation

The journal is aimed at informing the readership about the latest achievements and prospects in the field of mechanics, mechanical engineering, computer science and computer technology. The publication is a forum for cooperation between Russian and foreign scientists, it contributes to the convergence of the Russian and world scientific and information space.

The journal is included in the List of the leading peer-reviewed scientific publications (Higher Attestation Commission under the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation), where basic scientific results of dissertations for the degrees of Doctor and Candidate of Science in scientific specialties and their respective branches of science should be published.

The journal publishes articles in the following fields of science:
– Theoretical Mechanics, Dynamics of Machines (Engineering Sciences)
– Deformable Solid Mechanics (Engineering, Physical and Mathematical Sciences)
– Mechanics of Liquid, Gas and Plasma (Engineering Sciences)
– Mathematical Simulation, Numerical Methods and Program Systems (Engineering Sciences)
– System Analysis, Information Management and Processing, Statistics (Engineering Sciences)
– Automation and Control of Technological Processes and Productions (Engineering Sciences)
– Software and Mathematical Support of Machines, Complexes and Computer Networks (Engineering Sciences)
– Computer Modeling and Design Automation (Engineering, Physical and Mathematical Sciences)
– Computer Science and Information Processes (Engineering Sciences)
– Machine Science (Engineering Sciences)
– Machine Friction and Wear (Engineering Sciences)
– Technology and Equipment of Mechanical and Physicotechnical Processing (Engineering Sciences)
– Engineering Technology (Engineering Sciences)
– Welding, Allied Processes and Technologies (Engineering Sciences)
– Methods and Devices for Monitoring and Diagnostics of Materials, Products, Substances and the Natural Environment (Engineering Sciences)
– Hydraulic Machines, Vacuum, Compressor Equipment, Hydraulic and Pneumatic Systems (Engineering Sciences)

Registration:	Extract from the Register of Registered Mass Media ЭЛ № ФС 77 – 78854 dated August 07, 2020, issued by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Media
Indexing and Archiving:	RISC, CyberLeninka, CrossRef, Dimensions, DOAJ, EBSCO, Index Copernicus, Internet Archive, Google Scholar
Website:	http://vestnik-donstu.ru
Address of the Editorial Office	1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation
E-mail:	vestnik@donstu.ru
Telephone:	+7 (863) 2–738–372
Date of Publication No.4,2024:	30.12.2024



Editorial Board

Содержание

Contents

МЕХАНИКА
MECHANICS




УДК 620.179.16
https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-4-307-315

Оригинальное эмпирическое исследование

Оценка напряжений в пластине с концентратором посредством ультразвуковых измерений акустической анизотропии



EDN: RMBTZU

Д.А. Третьяков ✉, **Д.С. Осовик**
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация
✉ dmitry.tretyakov93@yandex.ru

Аннотация
Введение. Акустическая анизотропия измеряется при ультразвуковом неразрушающем контроле и позволяет оценить величину напряжений методом акустоупругости. В литературе подробно описано применение такого подхода в случае двухосного напряженного состояния протяженных конструкций: магистральных трубопроводов, рельсовых плетей, парогенераторов и других. Для них предполагается наличие однородного поля с нулевыми либо слабыми градиентами напряжений и деформаций. Однако не решена проблема своевременного обнаружения и оценки критических напряжений, вызванных локальными концентраторами, посредством ультразвукового контроля. Представленный материал призван восполнить этот пробел. Цель работы — определить возможности применения метода акустоупругости для оценки разности главных двухосных напряжений вокруг концентратора — кругового выреза в прямоугольной пластине.
Материалы и методы. Из листа технически чистого алюминия марки АМц поперек направления проката вырезали пластину 510×120×15 мм с центральным отверстием диаметром 40 мм и подвергли ее одноосному ступенчатому нагружению в испытательной машине Instron-8850. Для ультразвуковых измерений задействовали акустический датчик с несущей частотой 5 МГц. Напряжения рассчитывались путем решения задачи о растяжении изотропной линейно-упругой пластины в пакете конечно-элементного моделирования «Ансис» (Ansys) и по соотношениям плоской задачи Кирша, полученным в полярной системе координат.
Результаты исследования. Итоги работы позволяют утверждать, что результаты аналитических и численных расчетов во многом совпадут только для точек, расположенных рядом с зоной наибольшей концентрации напряжений. Во всех остальных случаях показатели отличаются в несколько раз по знаку, и по модулю. Разница объясняется тем, что подход Кирша предполагает действие сжимающих напряжений в области расположения некоторых точек, однако этот фактор отсутствует, если речь идет о реальной пластине. Установлено, что в области материала с преобладающими растягивающими напряжениями метод акустоупругости позволяет количественно оценить их разность с погрешностью, не превышающей инженерную. Расчеты по соотношениям Кирша коррелируют с остальными только в точках с максимальной концентрацией растягивающих напряжений.
Обсуждение и заключение. Результаты исследования позволяют применять метод акустоупругости для оценки величины растягивающих двухосных напряжений в области вокруг технологических отверстий. Они согласуются с известными научными результатами и дают возможность рационально выбрать точки измерения акустической анизотропии. Итоги данной научной работы можно применить при ультразвуковом неразрушающем контроле методом акустоупругости.

Ключевые слова: зона наибольшей концентрации напряжений, разности главных напряжений, акустическая анизотропия начально неоднородного материала, напряженно-деформированное состояние, ультразвуковой неразрушающий контроль

Благодарности. Авторы выражают благодарность редакции и рецензентам за внимательное отношение к статье и замечания, которые позволили повысить ее качество.

Финансирование. Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ за счет стипендии № СП–5336.2022.1 Президента Российской Федерации.

Для цитирования. Третьяков Д.А., Осовик Д.С. Оценка напряжений в пластине с концентратором посредством ультразвуковых измерений акустической анизотропии. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don).* 2024;24(4):307–315. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-4-307-315

Original Empirical Research

Estimation of Stresses in a Plate with a Concentrator through Ultrasonic Measurements of Acoustic Anisotropy

Dmitry A. Tretyakov✉, **Dmitry S. Osovik**
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation
✉ dmitry.tretyakov93@yandex.ru

Abstract
Introduction. Acoustic anisotropy is measured during ultrasonic nondestructive testing. It estimates the magnitude of stresses by the acoustoelasticity method. The literature describes in detail the application of this approach in the case of a biaxial strength of extended structures: main pipelines, rail strings, steam generators, and others. They assume the presence of a uniform field with zero or weak gradients of stresses and deformations. However, the problem of timely detection and assessment of critical stresses caused by local concentrators through ultrasonic testing has not been solved. The presented material is intended to fill this gap. The work is aimed at determining the possibilities of the acoustoelasticity method to estimate the difference in the main biaxial stresses around the concentrator — a circular cutout in a rectangular plate.
Materials and Methods. A 510×120×15 mm plate with a central hole of 40 mm in diameter was cut from a sheet of commercial-purity aluminum of the AMc brand (AW-3003 according to ISO) across the rolling direction, and subjected to uniaxial step loading in an Instron-8850 testing machine. For ultrasonic measurements, an acoustic sensor with a carrier frequency of 5 MHz was used. The stresses were calculated by solving the problem of stretching an isotropic linear-elastic plate in the ANSYS finite element modeling package and by the relations of the plane Kirsch problem obtained in the polar coordinate system.
Results. The research allows us to state that the results of analytical and numerical calculations largely coincide only for points located near the zone of greatest stress concentration. In all other cases, the indicators differ several times in sign and modulus. The difference is explained by the fact that Kirsch's approach assumes the action of compressive stresses in the area of location of some points, but this factor is absent if we are talking about a real plate. It has been established that in the area of material with predominant tensile stresses, the acoustoelasticity method allows for a quantitative estimate of their difference with an error not exceeding the engineering one. Calculations based on the Kirsch relations correlate with the others only at points with the maximum concentration of tensile stresses.
Discussion and Conclusion. The results of the study provide applying the acoustoelasticity method to estimate the magnitude of tensile biaxial stresses in the area around the fabrication holes. They are consistent with well-known scientific results and make it possible to rationally select the measurement points of acoustic anisotropy. The results of this scientific work can be applied in ultrasonic non-destructive testing using the acoustoelasticity method.

Keywords: zone of highest stress concentration, principal stress differences, acoustic anisotropy of initially inhomogeneous material, stress-strain state, ultrasonic nondestructive testing

Acknowledgements. The authors would like to thank the Editorial board and the reviewers for their attentive attitude to the article and for the specified comments that improved the quality of the article.

Funding Information. The research is done with the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation at the expense of the Russian Presidential Scholarship No. SP–5336.2022.1.

For Citation. Tretyakov DA, Osovik DS. Estimation of Stresses in a Plate with a Concentrator through Ultrasonic Measurements of Acoustic Anisotropy. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don).* 2024;24(4):307–315. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-4-307-315

Введение. В последние десятилетия разрабатываются отечественные технологии неразрушающего контроля для определения напряженно-деформированного состояния элементов энергетических систем, железнодорожного и трубопроводного транспорта [1]. Эти подходы предполагают решение обратных задач в случае неоднородного напряженного состояния [2], бесконтактную электромагнитно-акустическую тензометрию [3], учет деградации упругих свойств при комбинированном неразрушающем контроле [4], а также прецизионное измерение временных задержек при распространении упругих волн в материале [5]. Технологии прошли верификацию в

ходе промышленных измерений[1] [6], их применение сопровождается работой современного диагностического оборудования [7]. Однако остается актуальной задача апробации существующих подходов при диагностике анизотропных конструкционных материалов, к числу которых относится промышленный прокат [8].

Данная работа посвящена исследованию акустической анизотропии [9] начально неоднородного материала. В данном случае это технически чистый алюминий марки АМц. Образцы, вырезанные из катаного листа, не проходили подготовку по снятию начальных внутренних напряжений, вызванных пластической деформацией в процессе прокатки [10]. Задача — установить возможность оценки разности величины двухосных напряжений в металле с неоднородной начальной акустической анизотропией [11].

Материалы и методы. В экспериментах использовали ультразвуковой анализатор акустической анизотропии ИН-5101А[2]. Это сертифицированный прибор для измерения механических напряжений методом акустоупругости [12]. Напряжения рассчитывались по формуле:

$$\sigma_{\theta\theta} = \sigma_{rr} = D\left(a_\sigma - a_0\right). \quad (1)$$

Здесь $\sigma_{\theta\theta}$ и σ_{rr} — главные компоненты тензора напряжений в полярных координатах; D — коэффициент упругоакустической связи материала; a_0 — начальная акустическая анизотропия в точке измерений; a_σ — значение параметра акустической анизотропии при текущей величине одноосной растягивающей нагрузки σ. Для алюминиевого сплава АМц коэффициент $D = –2{,}0 \pm 0{,}3 \cdot 10^{-4}$ МПа [13].

Текущее значение параметра акустической анизотропии a_0 [14] определялось по формуле (2) как относительная разность времен распространения поперечных ультразвуковых волн взаимно ортогональной поляризации [15]:

$$a_\sigma = \left(t_2 - t_1\right) / \left(\left(t_2 + t_1\right)/2\right). \quad (2)$$

Здесь t_1, t_2 — текущие значения временных задержек при прохождении пакетов поперечных волн по толщине материала после их многократного отражения, скорости которых направлены вдоль и поперек линии одноосного нагружения.

Измерения проводились с помощью акустических датчиков с частотой излучения импульсов 5 МГц. Точность измерений временных задержек t_1, t_2 составляла 3 нс.

Исследовался малолегированный коррозионно-стойкий алюминиево-марганцевый сплав марки АМц, близкий по своим свойствам к технически чистому алюминию (97/99 % Al по составу). Алюминий — это модельный материал для ультразвуковых исследований. Именно с ним получены основные результаты в области акустоупругости [1].

Механические испытания проводились на прямоугольной пластине размером 510×120×15 мм, вырезанной из катаного алюминиевого листа поперек направления проката. Образец имел концентратор напряжений в виде центрального кругового отверстия диаметром 40 мм (рис. 1).

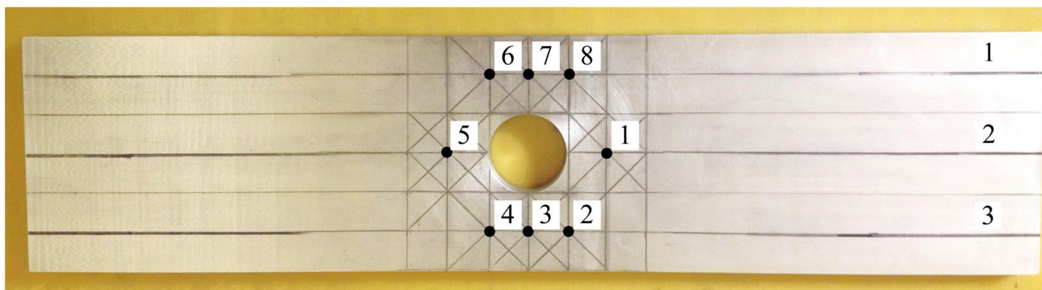


Рис. 1. Схема образца из листа алюминиевого проката марки АМц

Направление проката влияет на знак начальной акустической анизотропии a_0 [16]:

$$a_0 = \left(t_{02} - t_{01}\right) / \left(\left(t_{02} + t_{01}\right)/2\right). \quad (3)$$

Здесь t_{01}, t_{02} — начальные временные задержки поперечных волн. В случае образцов, вырезанных поперек проката, безразмерный параметр начальной акустической анизотропии a_0, вычисленный по формуле (3), будет отрицательным: $a_0 < 0$.

Для жесткого ступенчатого нагружения пластины применили одноосное растяжение в гидравлической машине Instron-8850 (рис. 3). Рассматривалось напряженно-деформированное состояние на трех этапах нагружения при значениях растягивающей нагрузки $F_1 = 30$ кН, $F_2 = 50$ кН и $F_3 = 70$ кН. Для исследования выбрали $n = 8$ участков (точек) образца. Схема их расположения представлена на рис. 2.

[1] ГОСТ Р 52731–2007. *Контроль неразрушающий. Акустический метод контроля механических напряжений. Общие требования.* Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200051032 (дата обращения: 25.05.2024).

[2] *Приборы для измерения механических напряжений ИН-5101А. Руководство по эксплуатации. ИНКО.468160.008 РЭ.* URL: https://encotes.ru/system/files/RE-IN-5101A_0.pdf?ysclid=m00rujbqr0495004447 (дата обращения: 25.05.2024).

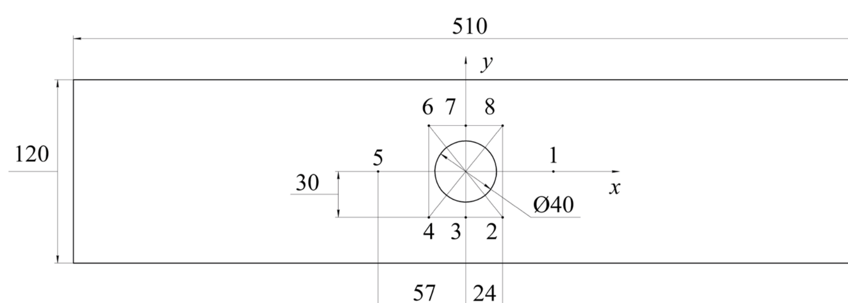


Рис. 2. Схема расположения исследуемых точек образца

Ультразвуковой контроль проводили вдоль трех рядов точек: 1–5, 2–4 и 6–8, симметрично расположенных друг относительно друга вокруг концентратора напряжений (рис. 2). Характерный размер пластин пьезоэлектрических элементов акустического датчика — 12×12 мм. Это означает, что с каждой точкой был связан свой локальный представительный объем материала. Точки выбрали так, чтобы представительные объемы существенно различались по напряженно-деформированному состоянию [17].

Механические испытания на растяжение в машине типа Instron предполагают разные граничные условия для образца. Нижняя его часть (точки 4, 5, 6 на рис. 2) жестко зафиксирована в неподвижном захвате испытательной машины (рис. 3). В верхней части (точки 1, 2 и 8 на рис. 2), закрепленной в подвижном захвате, образец растягивался с малой постоянной скоростью деформации (рис. 3). Точки 3 и 7 располагались на центральной поперечной оси образца (рис. 2).

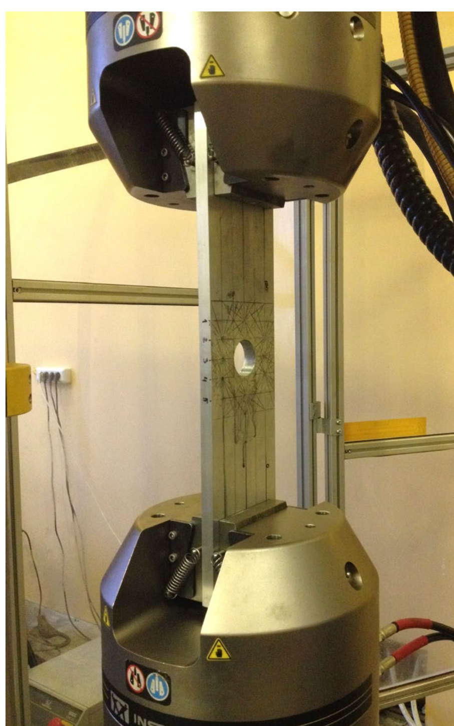


Рис. 3. Образец под нагрузкой в испытательной машине

Асимметрия условий задачи учитывалась при численном моделировании методом конечных элементов. Использовались реальные размеры образца, его упругие и механические свойства, полученные в ходе испытаний образцов из той же партии (модуль Юнга E, предел текучести σ_y, модуль упругости H), а также известные данные для технически чистого алюминия (плотность ρ, коэффициент Пуассона ν). Учитывалось, что образец закрепляется в испытательной машине по широкой поверхности и касательная растягивающая нагрузка прикладывается к ней, а не к торцу образца, как в случае двумерных моделей.

Напряженно-деформированное состояние рассчитывали в пакете конечно-элементного моделирования Ansys. С учетом площади приложения нагрузок F_1, F_2, F_3 определены значения растягивающих напряжений: $\sigma_1 = 16{,}67$ МПа, $\sigma_2 = 27{,}78$ МПа и $\sigma_3 = 38{,}89$ МПа. Их использовали при численном решении. На рис. 4 представлена модель образца с отображением конечно-элементной сетки и граничных условий. Она состоит из 936 152 элементов и 3 981 073 узлов.

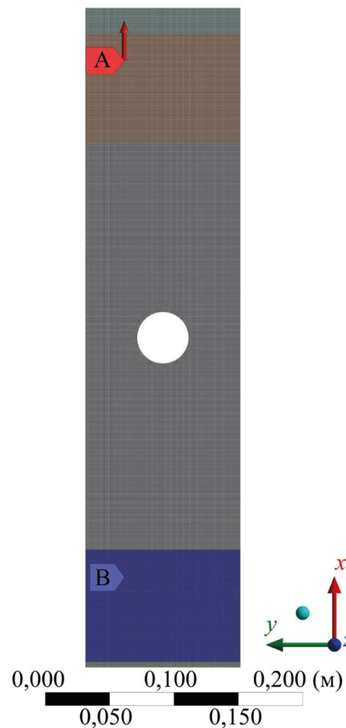


Рис. 4. Конечно-элементная модель образца с учетом граничных условий

Аналитическое решение основывалось на использовании формул (4) и (5), являющихся решением задачи Кирша в полярных координатах [18]:

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{S}{2}\left(1+\frac{a^2}{r^2}\right)-\frac{S}{2}\left(1+\frac{3a^4}{r^4}\right)cos\,2\theta, \quad (4)$$

$$\sigma_{rr} = \frac{S}{2}\left(1-\frac{a^2}{r^2}\right)+\frac{S}{2}\left(1+\frac{3a^4}{r^4}-\frac{4a^2}{r^2}\right)cos\,2\theta, \quad (5)$$

где S — нагрузка, прикладываемая к пластине; a — радиус отверстия пластины; r — расстояние от центра отверстия до точки расчета напряжений; θ — угол, соответствующий рассчитываемой точке.

Постановка задачи в данной работе предполагает наличие только упругих деформаций образца. Ее дальнейшее развитие, учитывающее влияние неупругих деформаций, связано с рассмотрением решения плоской упругопластической задачи о растяжении пластинки с круговым отверстием (идеального пластического тела), полученного Л.А. Галиным в 1946 году [19].

Рассчитаны главные напряжения, сонаправленные с продольной осью x ($\sigma_{\theta\theta}$) и поперечной осью y образца (σ_{rr}) для всех n = 8 исследуемых точек. Компоненты $\sigma_{\theta\theta}$, σ_{rr} — функции от радиального расстояния до центра отверстия r и от угла θ, измеренного относительно исходной оси. Соотношения (4) и (5) получены в предположении, что круглое отверстие находится в центре бесконечной изотропной линейно-упругой пластины, подверженной равномерному плоскому нагружению. Ранее они использовались в работе [20] для определения напряжений в двух областях на границе отверстия, расположенных вдоль (θ = 0°) и поперек (θ = 90°) линии действия нагрузки.

Ультразвуковые измерения проводились в точках 1, 2 и 3 (рис. 2) в образце до нагружения (F_0 = 0 кН), а также при достижении уровней упругой деформации, соответствующих нагрузкам F_1, F_2, F_3. Исследовалось влияние конечных размеров пластины (в основном, в ее поперечном сечении) на расхождение между значениями напряжений, полученных экспериментально, численно и аналитически. Значения акустической анизотропии a_0, % и a_σ, % рассчитали по формулам (2) и (3). Для учета эффектов, связанных с релаксацией напряжений, проводили контрольные измерения в начале и конце каждого этапа. Всего измерили 198 временных задержек (t_{01}, t_{02}) и (t_1, t_2) при распространении поперечных волн вдоль и поперек образца.

Результаты исследования. В таблице 1 приводятся значения внутренних напряжений σ_{xx} (аналог $\sigma_{\theta\theta}$ в полярной системе координат) и σ_{yy} (аналог σ_{rr}) для n = 8 точек вокруг отверстия пластины (рис. 2). Их получили в результате конечно-элементного моделирования и расчетов по формулам (4) и (5) при внешних растягивающих напряжениях $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ (соответствуют нагрузкам F_1, F_2, F_3).

Таблица 1

Расчетные значения напряжений вокруг отверстия пластины, МПа

Нагрузка	F_1 = 30 кН (σ_1 = 16,67 МПа)		F_2 = 50 кН (σ_2 = 27,78 МПа)		F_3 = 70 кН (σ_3 = 38,89 МПа)	
N	σ_{xx}, σ_{yy}, Ansys	$\sigma_{\theta\theta}$, σ_{rr}, Кирш	σ_{xx}, σ_{yy}, Ansys	$\sigma_{\theta\theta}$, σ_{rr}, Кирш	σ_{xx}, σ_{yy}, Ansys	$\sigma_{\theta\theta}$, σ_{rr}, Кирш
1,0	12,120 1,270	0,647 11,920	20,210 2,110	1,078 19,860	28,280 2,960	1,510 27,800
2,8	22,090 –3,380	13,060 5,800	38,160 –5,640	21,760 9,666	53,420 –7,890	30,460 13,530
3,7	27,690 6,390	25,310 6,174	46,157 10,650	42,180 10,290	64,610 14,910	59,060 14,400
4,6	22,890 –3,390	13,060 5,800	38,170 –5,650	21,760 9,666	53,430 –7,920	30,460 13,530
5,0	12,180 1,230	0,647 11,920	20,310 2,500	1,078 19,860	28,430 2,870	1,510 27,800

Условия закрепления образца различны: левая часть зафиксирована, правая подвижна. Отсюда асимметрия в паттерне поля деформаций образца, которая сохраняется при всех значениях нагрузок в упругой области (пример для F_1 = 30 кН представлен на рис. 5).

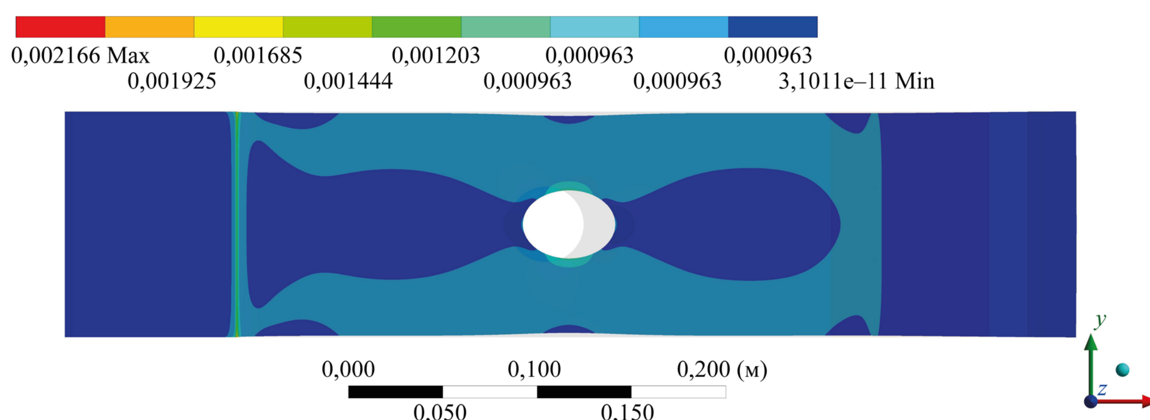


Рис. 5. Расчетное поле деформаций при растягивающей нагрузке F = 30 кН

Из-за отмеченной выше асимметрии при решении задачи методом конечных элементов значения напряжений в парах точек:

– совпадают, если они получены зеркальным отражением относительно центральной продольной оси образца;

– отличаются, если они получены отражением относительно поперечной оси образца.

В первом случае примером могут служить пары 2 и 8; 3 и 7; 4 и 6, во втором — 1 и 5; 2 и 4; другие. Отметим, что даже если разница напряжений есть, она не превышает 1 МПа. Это соответствует уровню инженерной погрешности ±5 % (таблица 1). Совпадают значения напряжений, рассчитанные для указанных пар точек по формулам (4) и (5).

В итоге близкие значения между результатами аналитических и численных расчетов наблюдаются только для точек 3 и 7, расположенных вблизи области с наибольшей концентрацией напряжений (таблица 1). В остальных точках имеет место их кратное отличие не только по модулю (2 и 8; 4 и 6), но и по знаку (1 и 5). Это связано с тем, что вычисления по формулам (4) и (5) для пластины равных (бесконечных) размеров предполагают наличие зоны сжимающих напряжений в области расположения точек 1 и 5. Иная ситуация — с реальной пластиной (рис. 1 и 2), размеры которой ограничены и отличаются между собой по соотношению длины и ширины в 4,25 раза. В этом случае нет зоны сжимающих напряжений (таблица 1 и рис. 5).

Сравнение результатов говорит в пользу того, что влияние конечных размеров пластины не позволяет использовать соотношения (4) и (5) для оценки напряжений в данной задаче. Это противоречит выводам работы [20]. Отметим, что наличие корреляции для точек с максимальным значением коэффициента концентрации напряжений подтверждается результатами для пары точек 3 и 7.

В таблице 2 представлены начальные a_0 и текущие a_σ значения акустической анизотропии в области расположения точек 1, 2 и 3, вычисленные по формулам (2) и (3) в ненагруженном состоянии (F_0) и при трех значениях нагрузок F_1, F_2, F_3.

Таблица 2

Акустическая анизотропия и средние значения временных задержек на разных этапах нагружения

Нагрузка	F_0 = 0 кН σ_0 = 0 МПа		F_1 = 30 кН σ_1 = 16,67 МПа		F_2 = 50 кН σ_2 = 27,78 МПа		F_3 = 70 кН σ_3 = 38,89 МПа	
N	a_0	$\langle t_{01}\rangle$, $\langle t_{02}\rangle$, мкс	$a_{\sigma 1}$	$\langle t_1\rangle$, $\langle t_2\rangle$, мкс	$a_{\sigma 2}$	$\langle t_1\rangle$, $\langle t_2\rangle$, мкс	$a_{\sigma 3}$	$\langle t_1\rangle$, $\langle t_2\rangle$, мкс
1	– 0,005886	9,4805 9,4248	– 0,006198	9,4765 9,4180	– 0,006379	9,4802 9,4200	– 0,006445	9,4783 9,4174
2	– 0,004508	9,4602 9,4177	– 0,005947	9,5057 9,4494	– 0,006650	9,5107 9,4476	– 0,007636	9,5147 9,4423
3	– 0,005433	9,4730 9,4217	– 0,006461	9,5113 9,4500	– 0,007142	9,5161 9,4484	– 0,007055	9,5158 9,4489

Из таблицы 2 следует, что различие значений параметра начальной акустической анизотропии a_0 в точках 1, 2 и 3 во многом определяется начальной неоднородностью материала. Это видно по вариации параметра a_0 до нагружения. К тому же с приложением внешней нагрузки растет расхождение между значениями параметра акустической анизотропии a_σ в исследуемых точках.

На основании данных ультразвуковых измерений (таблица 3) рассчитаны значения ($\sigma_{\theta\theta} - \sigma_{rr}$) разности главных напряжений в полярных координатах по соотношениям акустоупругости (1) [21]. Они приведены в таблице 3 в сравнении с результатами конечно-элементного моделирования и расчетов по формулам (4) и (5). В круглых скобках указаны значения напряжений, отличающиеся для пар симметрично расположенных точек, полученных отражением относительно поперечной оси образца.

Таблица 3

Сравнение результатов ультразвуковых измерений, аналитических и численных конечно-элементных расчетов, МПа

Нагрузка	F_1 = 30 кН (σ_1 = 16,67 МПа)	F_2 = 50 кН (σ_2 = 27,78 МПа)	F_3 = 70 кН (σ_3 = 38,89 МПа)
N	($\sigma_{xx} - \sigma_{yy}$), Ansys ($\sigma_{\theta\theta} - \sigma_{rr}$), Кирш $D(a_{\sigma 1} - a_0)$	($\sigma_{xx} - \sigma_{yy}$), Ansys ($\sigma_{\theta\theta} - \sigma_{rr}$), Кирш $D(a_{\sigma 2} - a_0)$	($\sigma_{xx} - \sigma_{yy}$), Ansys ($\sigma_{\theta\theta} - \sigma_{rr}$), Кирш $D(a_{\sigma 3} - a_0)$
1 (5)	10,85 (10,95) –11,273 6,24	18,1 (17,81) –18,782 9,85	25,32 (25,56) –26,29 11,18
2,8 (4,6)	25,47 (26,28) 7,26 28,78	43,8 (43,82) 12,094 42,84	61,31 (61,35) 16,93 62,56
3, 7	21,3 19,136 20,55	35,507 31,89 34,17	49,7 44,66 44,80

Из таблицы 3 видно, что данные измерений методом акустоупругости и решения методом конечных элементов качественно и количественно коррелируют друг с другом. Следовательно, можно говорить о взаимной верификации результатов натурных и численных экспериментов. Наибольшая корреляция наблюдается для точек 2, 8; 4, 6; 3, 7, находящихся вблизи области максимальных растягивающих напряжений.

Иные результаты получены для точек 1 и 5, где по формулам (4) и (5) предполагалось наличие сжимающих напряжений. Здесь разности главных значений ($\sigma_{\theta\theta} - \sigma_{rr}$), полученные по данным ультразвуковых измерений, оказываются в среднем в два раза меньше прогнозируемых численных значений. Таким образом, расчеты по значениям акустической анизотропии дают нижнюю оценку напряжений для исследуемых участков образца.

Обсуждение и заключение. Исследованы главные двухосные напряжения в алюминиевой пластине вокруг концентратора — центрального кругового отверстия. Сопоставляются значения, полученные в результате натурных ультразвуковых измерений, численных экспериментов методом конечных элементов и аналитических расчетов по соотношениям Кирша. Учтено влияние асимметрии полей напряжений и деформаций, возникающей из-за различных условий закрепления образца и отражающей процесс одноосной упругой деформации при растяжении в испытательной машине.

Отмечено, что схожие результаты аналитических и численных расчетов наблюдаются только для точек, расположенных рядом с областью наибольшей концентрации напряжений. Во всех других случаях значения различаются в несколько раз и по модулю, и по знаку. Это объясняется наличием или отсутствием сжимающих напряжений. Аналитический подход предполагает, что они есть. В реальной пластине их нет. Таким образом, соотношения Кирша для напряжений одноосно растягиваемой бесконечной изотропной линейно-упругой пластины невозможно корректно применить в рассматриваемом случае.

Методом акустоупругости установлена корреляция между результатами численного моделирования и ультразвуковых измерений двухосных напряжений. Это особенно заметно в отношении точек, расположенных рядом с зоной максимальных растягивающих напряжений.

Результаты исследования могут быть использованы в промышленном неразрушающем контроле при диагностике напряжений в объектах из металлического проката.

Список литературы / References

1. Беляев А.К., Полянский В.А., Третьяков Д.А. Оценка механических напряжений, пластических деформаций и поврежденности посредством акустической анизотропии. Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2020;(4):130–151. https://doi.org/10.15593/perm.mech/2020.4.12

Belyaev AK, Polyanskiy VA, Tretyakov DA. Estimating of Mechanical Stresses, Plastic Deformations and Damage by means of Acoustic Anisotropy. *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2020;(4):130–151. https://doi.org/10.15593/perm.mech/2020.4.12

2. Vatul'yan AO. The Theory of Inverse Problems in the Linear Mechanics of a Deformable Solid. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*. 2010;74(6):648–653. https://doi.org/10.1016/j.jappmathmech.2011.01.004

3. Муравьев В.В., Стрижак В.А., Пряхин А.В. Исследование внутренних напряжений в металлоконструкциях методом акустоупругости. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2016;82(12):52–57. URL: https://www.zldm.ru/jour/article/view/349/350 (дата обращения: 25.05.2024).

Murav'ev VV, Strizhak VA, Pryakhin AV. Acousto-Elastic Study of the Internal Stresses in Metal Structures. *Industrial Laboratory. Diagnostics of Materials*. 2016;82(12):52–57. (In Russ.) URL: https://www.zldm.ru/jour/article/view/349/350 (accessed: 25.05.2024).

4. Kurashkin KV, Gonchar AV, Klyushnikov VA, Mishakin VV. Use of Texture-Dependent Ultrasonic Parameter as Indicator of Degradation of Hot-Rolled Thin-Sheet Steel Under Uniaxial Tension. *Journal of Nondestructive Evaluation*. 2022;41(2):46. https://doi.org/10.1007/s10921-022-00879-w

5. Uglov AL, Khlybov AA. On the Inspection of the Stressed State of Anisotropic Steel Pipelines Using the Acoustoelasticity Method. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2015;51:210–216. https://doi.org/10.1134/S1061830915040087

6. Степанова Л.Н., Бехер С.А., Курбатов А.Н., Тенитилов Е.С. Исследование напряженного состояния рельса с использованием акустоупругости и тензометрии. *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2013;65(7):103–109.

Stepanova LN, Beher SA, Kurbatov AN, Tenitilov ES. Mechanical Strains Condition Investigation in Rails by means of Acoustic Elasticity and Strain Measurement. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2013;65(7):103–109.

7. Ivanova Y, Partalin T, Pashkuleva D. Acoustic Investigations of the Steel Samples Deformation during the Tensile. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2017;53(1):39–50. https://doi.org/10.1134/S1061830917010077

8. Volkova LV, Murav'eva OV, Murav'ev VV. Nonuniformity of Acoustic Anisotropy of Thick-Sheet Steel. *Steel in Translation*. 2021;51:335–341. https://doi.org/10.3103/S0967091221050120

9. Belyaev AK, Lobachev AM, Modestov VS, Pivkov AV, Polyanskii VA, Semenov AS, et al. Estimating the Plastic Strain with the Use of Acoustic Anisotropy. *Mechanics of Solids*. 2016;51:606–611. https://doi.org/10.3103/S0025654416050149

10. Murav'ev VV, Murav'eva OV, Volkova LV. Influence of the Mechanical Anisotropy of Thin Steel Sheets on the Parameters of Lamb Waves. *Steel in Translation*. 2016;46:752–756. https://doi.org/10.3103/S0967091216100077

11. Khlybov AA, Uglov AL. On an Acoustic Testing Method for Monitoring the Spatial Inhomogeneity of Plastic Deformation in Weakly Anisotropic Orthotropic Materials. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2023;59(1):22–32. https://doi.org/10.1134/S1061830923700183

12. Nikitina NYe, Kamyshev AV, Kazachek SV. Application of the Acoustoelasticity Phenomenon in Studying Stress States in Technological Pipelines. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2009;45:861–866. https://doi.org/10.1134/S1061830909120043

13. Никитина Н.Е. *Акустоупругость. Опыт практического применения.* Нижний Новгород: ТАЛАМ; 2005. 208 с.

Nikitina NYe. *Acoustoelasticity. Application Experience*. Nizhny Novgorod: TALAM; 2005. 208 p. (In Russ.)

14. Erofeev VI, Ilyakhinsky AV, Nikitina EA, Pakhomov PA, Rodyushkin VM. Ultrasonic Sensing Method for Evaluating the Limit State of Metal Structures Associated with the Onset of Plastic Deformation. *Physical Mesomechanics*. 2020;23:241–245. https://doi.org/10.1134/S102995992003008X

15. Murav'eva O, Murav'ev V, Volkova L, Kazantseva N, Nichipuruk A, Stashkov A. Acoustic Properties of Low-Carbon 2% Mn-Doped Steel Manufactured by Laser Powder Bed Fusion Technology. *Additive Manufacturing*. 2022;51:102635. https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.102635

16. Kurashkin KV. Study of the Acoustoelastic Effect in an Anisotropic Plastically Deformed Material. *Acoustical Physics*. 2019;65(3):316–321. https://doi.org/10.1134/S1063771019030047

17. Grishchenko AI, Modestov VS, Polyanskiy VA, Tretyakov DA, Shtukin LV. Experimental Investigation of the Acoustic Anisotropy Field in the Sample with a Stress Concentrator. *St. Petersburg Polytechnical University Journal: Physics and Mathematics*. 2017;3(1):77–82. https://doi.org/10.1016/j.spjpm.2017.02.005

18. Kirsch G. Die Theorie der Elastizitat und die Bedurfnisse der Festigkeitslehre. *Zeitshrift des Vereines deutscher Ingenieure*. 1898;42:797–807.

19. Галин Л.А. Плоская упругопластическая задача. *Прикладная математика и механика*. 1946;10(3):367–386. URL: https://pmm.ipmnet.ru/ru/get/1946/10-3/367-386 (дата обращения: 25.05.2024).

Galin LA. Plane Elastico-Plastic Problem. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics.* 1946;10(3):367–386. (In Russ.) URL: https://pmm.ipmnet.ru/ru/get/1946/10-3/367-386 (accessed: 25.05.2024).

20. Nikitina NE, Kazachek SV. Theoretical and Experimental Study of Stress Concentration during Stretching of a Plate with a Cut. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2008;37(1):38–41. URL: https://link.springer.com/article/10.1007/s12001-008-1009-9 (accessed: 25.05.2024).

21. Nikitina NYe, Kamyshev AV, Kazachek SV. The Application of the Acoustoelasticity Method for the Determination of Stresses in Anisotropic Pipe Steels. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2015;51:171–178. https://doi.org/10.1134/S1061830915030079

Об авторах:

Дмитрий Алексеевич Третьяков, кандидат технических наук, доцент Высшей школы автоматизации и робототехники института машиностроения, материалов и транспорта Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29 б), SPIN-код, ORCID, ScopusID, ResearcherID, dmitry.tretyakov93@yandex.ru

Дмитрий Сергеевич Осовик, студент Высшей школы автоматизации и робототехники института машиностроения, материалов и транспорта Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29 б), ORCID, osovik.dim@gmail.com

Заявленный вклад авторов:

Д.А. Третьяков: научное руководство, ультразвуковые измерения и расчеты методом акустоупругости, подготовка текста.

Д.С. Осовик: численные конечно-элементные расчеты, подготовка иллюстраций с сеточной моделью и расчетными полями напряжений и деформаций пластины.

Конфликт интересов: **авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

***About the Authors*:**

Dmitry A. Tretyakov, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Higher School of Automation and Robotics, Institute of Machinery, Materials, and Transport, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (29 B, Polytechnicheskaya Str., St. Petersburg, 195251, Russian Federation), SPIN-code, ORCID, ScopusID, ResearcherID, dmitry.tretyakov93@yandex.ru

Dmitry S. Osovik, student of the Higher School of Automation and Robotics, Institute of Machinery, Materials, and Transport, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (29 B, Polytechnicheskaya Str., St. Petersburg, 195251, Russian Federation), ORCID, osovik.dim@gmail.com

***Claimed Contributorship*:**

DA Tretyakov: academic advising, ultrasonic measurements and calculations by the acoustoelasticity method, preparation of the text.

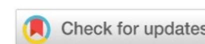
DS Osovik: numerical finite element calculations, preparation of illustrations with a mesh model and fields of the stress-strain state of the plate.

***Conflict of Interest Statement*: the authors declare no conflict of interest.**

All authors have read and approved the final version of the manuscript.

Поступила в редакцию / Received 23.09.2024
Поступила после рецензирования / Reviewed 20.10.2024
Принята к публикации / Accepted 28.10.2024

МЕХАНИКА
MECHANICS

УДК 621.836.2; 621.89.012.75
https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-4-316-327

Оригинальное эмпирическое исследование

Исследование параметров, влияющих на установление гидростатического режима в узле крейцкопф-направляющие плунжерного насоса высокого давления


EDN: TSFHRJ

М.В. Корчагина, **В.Н. Степанов**, **С.О. Киреев**, **А.Р. Лебедев**
Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация
ms.korchaginamv@mail.ru

Аннотация

Введение. При использовании технологии гидроразрыва пласта для повышения эффективности пластовых флюидов используют насосы высокого давления с крейцкопфной компоновкой приводной части. Основная проблема при эксплуатации данных насосов — износ направляющих крейцкопфа, представляющего собой плоскую поступательную пару трения, приводящий к износу уплотнений плунжера и снижению основных показателей насоса. На пути решения данной задачи ранее было предложено применение новых материалов и антифрикционных покрытий, оригинальных конструкций узлов трения и пр. Однако детального описания и решения рассматриваемой проблемы в настоящее время в литературе не найдено. Целью данного исследования является определение при максимальной нагрузке влияния конструкции узла, температуры процесса и давления в системе смазки на значения параметров, обеспечивающих гидростатический режим для плоского подпятника в узле крейцкопф-направляющие плунжерного насоса высокого давления.

Материалы и методы. Определение параметров проводилось методом имитационного моделирования с использованием модального анализа, применимого в случае возникновения высоких динамических нагрузок, действующих на исследуемый узел. Расчет гидродинамических параметров смазочного слоя основан на объединении модели Рейнольдса и модели Стокса в численном моделировании. Исследование проводилось с использованием расчетной модели, представляющей собой секцию плунжерного насоса, рассматриваемой с точки зрения модели «гибких тел», в поле сил гравитации. Математические зависимости рассматриваемых параметров представлены в виде уравнений регрессии, полученных по результатам численного эксперимента.

Результаты исследования. Определено значение максимальной нагрузки на нижнюю направляющую крейцкопфа, для которого проводились дальнейшие гидродинамические исследования. Исследованы факторы, оказывающие влияние на процесс — зазоры, заполняемые смазкой (зависящие от конструкции узла), температура и давление в системе смазки. Получены математические зависимости влияния рассмотренных факторов на значения параметров, определяющих установление гидростатического режима.

Обсуждение и заключение. Полученные математические модели показывают степень и характер влияния рассматриваемых факторов на исследуемые параметры гидростатического режима смазки узла — силу, действующую на крейцкопф от смазочного слоя и массовый расход смазки на выходе системы. Выявлено, что наибольшее влияние оказывают изменение объема зазоров, заполненных смазкой, массовый расход смазки на входе в систему, который моделирует увеличение давления в смазочной системе узла трения. Полученные результаты не противоречат выводам, полученным в работах подобной тематики, и могут быть использованы в дальнейших исследованиях.

Ключевые слова: плунжерный насос, крейцкопф, гидростатическое трение, плоский поступательный подшипник, смазочный слой, гидродинамические параметры

Благодарности. Авторы выражают благодарность кандидату технических наук, доценту Ефимову А.В. за консультации по конструкциям крейцкопфных узлов.

Финансирование. Работа выполнена в рамках госбюджетной НИОКР АААА–А20–120012190068–8 «Исследование, моделирование и разработка инновационных конструкций машин и оборудования нефтегазовых промыслов».

Для цитирования. Корчагина М.В., Степанов В.Н., Киреев С.О., Лебедев А.Р. Исследование параметров, влияющих на установление гидростатического режима в узле крейцкопф-направляющие плунжерного насоса высокого давления. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don).* 2024;24(4):316–327. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-4-316-327

Original Empirical Research

Investigation of Parameters Influencing the Establishment of Hydrostatic Mode in the Crosshead-Guide Assembly of High-Pressure Plunger Pump

Marina V. Korchagina ✉, **Valentin N. Stepanov**, **Sergey O. Kireev**, **Alexey R. Lebedev**
Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation
✉ ms.korchaginamv@mail.ru

Abstract
Introduction. When applying hydraulic fracturing technology to increase the efficiency of formation fluids, high-pressure pumps with a crosshead drive assembly are used. The major problem in the operation of these pumps is the wear of the crosshead guides. The crosshead is a flat sliding friction pair, leading to wear of the plunger seals and a decrease in the basic pump performance indicators. To solve this problem, it was previously proposed to use new materials and antifriction coatings, original designs of friction units, etc. However, a detailed description and solution to the problem under consideration has not been found in the literature at present. The objective of this study is to determine, under maximum load, the influence of the unit design, process temperature and pressure in the lubrication system on the values of the parameters that provide for the hydrostatic mode for a flat thrust bearing in a crosshead-guide unit of a high-pressure plunger pump.
Materials and Methods. The parameters were determined by the simulation technique using modal analysis applicable in the case of high dynamic loads acting on the studied unit. The calculation of the hydrodynamic parameters of the lubricating layer was based on the combination of the Reynolds model and the Stokes model in numerical modeling. The study was conducted using a calculation model representing a section of a plunger pump, considered as "flexible bodies" model, in the field of gravity forces. The mathematical dependences of the parameters under consideration were presented in the form of regression equations obtained from the results of a numerical experiment.
Results. The maximum load on the lower crosshead guide was determined, for which further hydrodynamic studies were conducted. Factors influencing the process were studied — gaps filled with lubricant (depending on the design of the unit), temperature, and pressure in the lubrication system. Mathematical dependences of the influence of the considered factors on the values of the parameters determining the establishment of the hydrostatic mode were obtained.
Discussion and Conclusion. The obtained mathematical models show the degree and influence of the factors under consideration on the studied parameters of the hydrostatic lubrication mode of the unit — the force acting on the crosshead from the lubricating layer, and the mass flow rate of the lubricant at the outlet of the system. It is found that the greatest influence is exerted by the change in the volume of gaps filled with lubricant, the mass flow rate of lubricant at the entrance to the system, which simulates the increase in pressure in the lubrication system of the friction unit. The results obtained do not contradict the conclusions reached in works on similar topics, and can be used in further research.

Keywords: plunger pump, crosshead, hydrostatic friction, flat sliding bearing, lubricating layer, hydrodynamic parameters

Acknowledgements. The authors would like to thank A.V. Efimov, Cand.Sci. (Engineering), Associate Professor, for consultations on crosshead assembly designs. The authors also appreciate the Editorial board of the Journal and anonymous reviewers for constructive comments that allowed improving the article.

Funding Information. The work was done within the framework of the state-financed R&D AAAA–A20–120012190068–8 "Research, Modeling and Development of Innovative Designs of Machinery and Equipment for Oil and Gas Fields".

For Citation. Korchagina MV, Stepanov VN, Kireev SO, Lebedev AR. Investigation of Parameters Influencing the Establishment of Hydrostatic Mode in the Crosshead-Guide Assembly of High-Pressure Plunger Pump. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don).* 2024;24(4):316–327. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-4-316-327

Введение. Для эффективного извлечения пластовых флюидов широкое применение в последние время получили технологии гидроразрыва пласта и массированного гидроразрыва пласта (ГРП). Уникальные свойства материалов, используемых при гидроразрыве пласта, обеспечивают при коротком цикле производства небольшой объем инвестиций по сравнению с традиционной добычей. Энергетические компании зачастую отказываются от участия в долгосрочных проектах с нестабильным и неизвестным будущим. Однако гибкий производственный процесс технологии ГРП позволяет избежать неопределенности, характерной для сырьевых рынков, ориентирующихся на ближайшую перспективу [1]. Технология ГРП требует использования насосов высокого давления (105 и 138 МПа) с большими расходами (9 000 л/мин) и мощностью более 5 000 кВт. Эластичные уплотнения поршневых насосов не выдерживают требуемых нагрузок и не позволяют регулировать усилия затяжки пакета уплотнений. Это привело к применению в этих условиях плунжерных насосов. При таких мощностях нагрузка на шток (плунжер) насоса может достигать более 140 тонн. При давлении в гидравлической части насоса 105 (138) МПа (с применением в качестве рабочих жидкостей высоко-агрессивных и высоко-абразивных сред) уплотнительные пакеты работают в чрезвычайно тяжелых условиях, моделированию которых посвящены работы [2, 3]. Для снятия радиальной нагрузки на уплотнения плунжера применяется крейцкопфная компоновка приводной части, когда всю радиальную нагрузку от шатунной группы воспринимает крейцкопф (ползун). В насосах большой мощности (3 500–5 000 кВт) нагрузка на крейцкопф в зоне контакта с направляющей может достигать десятков тонн, что может привести к срыву масляной пленки в зоне контакта.

Крейцкопф, передвигаясь по направляющим, обеспечивает радиальную фиксацию плунжера, воспринимая значительные знакопеременные нагрузки от шатуна и давления рабочей среды насоса. Крейцкопф изготавливается из высоколегированных сталей и, в отличие от направляющих, которые кроме центрирования должны обеспечивать минимум затрат на трение, испытывает значительные нагрузки. Износ направляющих крейцкопфа ведет к износу уплотнений плунжера и снижению давления и подачи. Направляющие крейцкопфа представляют собой композитную структуру — жесткое основание из углеродистой стали и антифрикционные вкладыши. Для уменьшения износа вкладышей посредством масляной гидравлической системы в зону контакта под давлением подается жидкостная смазка. Равномерное распределение смазки в зоне контакта обеспечивается маслораспределительными канавками на крейцкопфе. Однако указанные меры в конечном итоге обеспечивают довольно непродолжительный период работы (800–1 000 часов) крейцкопфной группы, что влечет за собой снижение ресурса использования всего насоса. Это обуславливает актуальность изучения условий возникновения гидростатического режима в рассматриваемом узле, представляющем собой плоский поступательный подшипник скольжения. Такое взаимодействие является типичным примером плоского скольжения твердой поверхности одной детали относительно другой, имеющее место во многих механизмах. Рассматриваемая пара трения представляет собой незамкнутую гидростатическую пару и имеет присущие подобным системам достоинства и недостатки. Нестабильность положения подвижного элемента приводит к неизбежным отклонениям гидростатического давления.

Подшипники скольжения являются узлами, определяющими надежность работы многих современных высокоскоростных и высоконагруженных машин (насосов, турбокомпрессоров, ДВС и др.). Узлы трения скольжения имеют ряд общих недостатков, приводящих к преждевременному износу и снижающих ресурс работы машины или агрегата. К ним относят недостаточную несущую и демпфирующую способность, приводящую к интенсивному износу, повышенным потерям мощности и расходу смазки, а также повышенный механический износ опорных поверхностей колодок (т.н. «просадок подшипника»), что требует повышенных зазоров.

Ввиду высокой актуальности, рассматриваемой проблемой занимаются многие исследователи. Авторы работы [4] формулируют индексы оценки эффективности нагрузки путем сравнения результатов с аналогичными, рассчитанными на виртуальной тестовой модели. В области проводимых исследований для узлов трения предлагают применение новых материалов и антифрикционных покрытий [5]. Качество узлов трения учитывается при первичных расчетах и проектировании. При этом методологии моделирования постоянно развиваются и совершенствуются [6]. Параметры, влияющие на узлы трения, постоянно изменяются в соответствии с условиями работы и материалами. Возникает потребность в новых методах моделирования и экспериментальной проверки полученных моделей. Ряд исследований посвящены проблеме разработки оптимизированных подшипниковых узлов. В работе [7] описывается эволюционный оптимизационный подход, позволяющий спроектировать подшипник с исключительными характеристиками как в специфических, так и в экстремальных условиях эксплуатации. Оптимизационный подход был применен при разработке прототипа упорного подшипника. Некоторые исследователи рассматривают вопросы получения защитного покрытия, снижающего износ на контактных поверхностях [8]. Результаты исследований [9] посвящены разработке математической модели радиальных подшипников скольжения конечной длины и демпферов с пористыми конструктивными элементами на поверхности подшипниковой втулки.

Многими исследователями отмечается важность выбора подходящей модели контактной силы для анализа динамической реакции в связи с наличием зазора. Наиболее близким к рассматриваемой проблеме является исследование, представленное в работе [10]. Проведенные моделирование и испытания показали, что динамические характеристики механизма с учетом трения имеют существенные различия на уровне ускорений. При учете трения увеличивается потребление энергии. Зазор в поступательной паре ползун(крейцкопф)-направляющие влияет на динамические характеристики и приводит к хаотическому отклику механизма. На основе эксперимента, проведенного авторами работы, была предложена 3D-модель шарнира с зазором для кривошипно-ползунного механизма. Эта модель представляет собой комплексное описание режимов контакта, в котором использована группа моделей контактных сил, отражающих различные явления контактного воздействия. Путем комбинирования теоретического расчета, моделирования и эксперимента выявлены нелинейные динамические характеристики механизма с поступательным шарниром с зазором. Однако исследование не затрагивает пару ползун-направляющие и потому не дает полного описания и решения рассматриваемой проблемы.

Все рассматриваемые исследования в той или иной мере посвящены проблеме повышения ресурса технических устройств, разработке новых или совершенствованию технологий и методов расчета, повышающих износостойкость узлов трения скольжения. Большинство работ посвящены работе радиальных и упорных подшипников вращения, имеющих линейный контакт поверхностей. Приводимые в них расчеты не могут быть в полной мере применены для плоских подшипников и поступательного действия. Все полученные результаты могут лечь в основу настоящего исследования, но требуют проверки на применимость для плоскостного контакта трущихся поверхностей, рассматриваемого в настоящем исследовании. Для разработки оптимальной конструкции системы питания узла трения необходимо провести многофакторное исследование, опирающееся на уравнение Рейнольдса, граничными условиями которого являются условия равенства давления в напорных и сливных плоскостях. Такой расчет необходим для определения параметров, при которых создается гидростатический режим трения. Целью данного исследования является определение при максимальной нагрузке влияния конструкции узла, температуры процесса и давления в системе смазки на значения параметров, обеспечивающих гидростатический режим для плоского подпятника в узле крейцкопф-направляющие плунжерного насоса высокого давления. Задачи исследования включают разработку расчетной модели, проведение численного эксперимента, обработку его результатов, выявление взаимосвязи и установление математических зависимостей между параметрами, влияющими на установление гидростатического режима работы плоского поступательного узла трения.

Материалы и методы. В настоящее время разработано и активно применяется для исследования сложных инженерных систем множество широко известных подходов к моделированию движения деформируемых конструкций. Наиболее приемлемым методом исследования в случае невозможности или высокой стоимости проведения эксперимента на реальном объекте, вследствие его высокой стоимости и значительных массо-габаритных характеристик, является метод имитационного моделирования. Среди разнообразных методов приближенного решения проблемы выделяется метод конечных элементов (МКЭ). Это простой, но в то же время очень продуктивный метод, допускающий множество различных формулировок, ориентированных на различные области применения. Он хорошо исследован и широко применяется на практике. В рассматриваемом случае высоких динамических нагрузок, действующих на исследуемый узел, когда оказывается необходимым учитывать инерционную связь между большими перемещениями тела и упругими деформациями, применимо использование модального анализа. Модальный анализ позволяет получить естественные частоты, формы и векторы мод, помогает в оценке сил и реакций системы при собственных частотах, возникающих в результате минимальных деформаций. Исследование силового взаимодействия в рассматриваемой системе предполагается на твердотельной модели секции плунжерного насоса средствами модального анализа с учетом свободных колебаний и частоты собственных мод всех элементов механизма. Данный метод дает хорошие результаты в случае проведения исследований динамических характеристик конструкции, подверженных вибрации [11].

Моделирование контактного взаимодействия крейцкопфа и направляющих сводится к решению динамической нелинейной задачи механики деформируемого твердого тела, в данной постановке представляющего систему, состоящую из кривошипного вала, шатуна и крейцкопфа-плунжера. При рабочем цикле насоса в элементах конструкции возникают нестационарные динамические напряжения, а контактное взаимодействие характеризуется изменяющейся во времени площадью контакта и силой. Движение механической системы описывается уравнением Лагранжа второго рода:

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i}\right)-\frac{\partial T}{\partial q_i}+\frac{\partial U}{\partial q_i}=Q_i,\ i=1,\ n, \qquad (1)$$

где T — кинетическая энергия системы; U — потенциальная энергия; Q_i — обобщенная сила; q_i — обобщенная скорость; i — число степеней свободы данной системы.

Формулировка метода конечных элементов (МКЭ) в терминах абсолютных координат учитывает небольшие упругие деформации и движение тела как единого целого. Эта формулировка охватывает весь спектр возможных задач в рассматриваемой области, однако она очень сложна как для её исследования, так и для проведения практических расчетов. Поэтому применение данного подхода в задачах, в которых упругие тела участвуют в макродвижении, но подвержены лишь малым деформациям, часто оказывается неоправданным с точки зрения эффективности.

Наиболее эффективным методом редукции модели является метод Крейга-Бэмптона, широко известный под именем динамической редукции или метода связанных подструктур. При выводе уравнений динамики упругих тел, подверженных глобальному движению и малым деформациям, вводится следующее дополнительное приближение: инерция упругой конструкции сосредоточена в узлах её МКЭ-модели. Данное приближение позволяет достаточно просто вывести уравнения динамики. Сами эти уравнения оказываются несложными. Метод Крейга-Бэмптона определяет матрицы обобщенной массы и обобщенной жесткости через модальную трансформацию [12].

Исследование гидродинамических параметров смазочного слоя основано на объединении модели Рейнольдса и модели Стокса в численном моделировании.

Уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}=0. \qquad (2)$$

Уравнения Навье-Стокса для модели движения вязкой несжимаемой среды [13]:

$$\begin{aligned}
&\frac{\partial u}{\partial t}+u\cdot\frac{\partial u}{\partial x}+v\cdot\frac{\partial u}{\partial y}+w\cdot\frac{\partial u}{\partial z}=\frac{-1}{\rho}\cdot\frac{\partial \rho}{\partial x}+\eta\cdot\Delta u+g_x,\\
&\frac{\partial v}{\partial t}+u\cdot\frac{\partial v}{\partial x}+v\cdot\frac{\partial v}{\partial y}+w\cdot\frac{\partial v}{\partial z}=\frac{-1}{\rho}\cdot\frac{\partial \rho}{\partial y}+\eta\cdot\Delta v+g_y,\\
&\frac{\partial w}{\partial t}+u\cdot\frac{\partial w}{\partial x}+v\cdot\frac{\partial w}{\partial y}+w\cdot\frac{\partial w}{\partial z}=\frac{-1}{\rho}\cdot\frac{\partial \rho}{\partial z}+\eta\cdot\Delta w+g_z,
\end{aligned} \qquad (3)$$

где v, w, u — компоненты вектора скорости в декартовой системе координат x, y, z; η — кинематическая вязкость; g_x, g_y, g_z — компоненты массовых сил; ρ — плотность вещества.

Для моделирования и исследования гидродинамической смазки был использован метод конечных элементов Рейнольдса-Стокса-Галеркина (R-SGFEM) с граничными условиями скольжения. Эффекты получены на основе уравнения Стокса, которое рассчитывается методом конечных элементов Галеркина [14]. Среди них модифицированное уравнение Рейнольдса эффективно обрабатывает границу скольжения с различной степенью проскальзывания. Уравнение Стокса решает проблему рециркуляции в микро-каналах. Метод Галеркина с элементами с высокой точностью и хорошей адаптацией к форме границ может точно моделировать давления и скорости в смазочном поле. Движение сплошной среды описываются системой уравнений гидродинамики.

Математические зависимости предполагается представить в виде уравнений регрессии, полученных по результатам численного эксперимента. Для построения уравнений регрессии предполагается использовать многофакторный регрессионный анализ с применением теории планирования эксперимента [15].

Результаты исследования. В качестве расчетной модели для проведения численного эксперимента была смоделирована секция плунжерного насоса в составе: кривошипный вал (1), шатун (2), крейцкопф (3), направляющие крейцкопфа (4), шток (5), плунжер (6), пакет уплотнений (7) (рис. 1). Материал элементов, используемых в динамическом расчете: кривошипный вал, шатун, крейцкопф-плунжер (сталь с модулем упругости 207 ГПа), направляющие (бронза с модулем упругости 106 ГПа), уплотнения плунжера (100 ГПа).

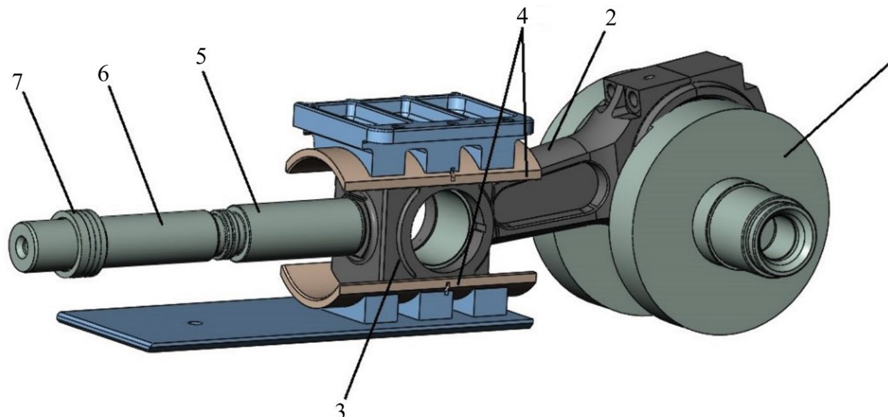


Рис. 1. Секция плунжерного насоса

Система рассматривалась с точки зрения модели «гибких тел» с шестью модами, для каждого элемента секции был проведен анализ движения крейцкопфа в поле сил гравитации [16]. Переопределены связи (контакт, вращение), задана частота вращения вала — 80 об/мин (480 град./с). Максимальное давление на плунжере — 105 МПа, диаметр плунжера — 80 мм. Давление от перекачиваемой среды на плунжер в процессе нагнетания смоделировано пружиной с соответствующей жесткостью, учитывающей ход плунжера 164 мм, на всасывании пружина автоматически отключается. Динамическая модель представлена на рис. 2.

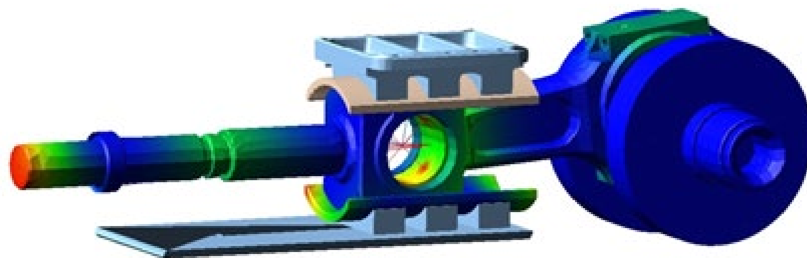


Рис. 2. Динамическая модель исследования

С помощью данной модели было определено значение максимальной нагрузки на нижнюю направляющую крейцкопфа, составляющую 43,5 кН, определено его положение, соответствующее данной нагрузке. Все дальнейшие расчеты проводились для этого значения нагрузки. По определенному положению максимальной нагрузки на нижнюю направляющую от крейцкопфа была смоделирована расчетная гидродинамическая модель, показанная на рис. 3. Зазор между крейцкопфом и направляющей составлял 0,35 мм. Толщина одного из шести расчетных пограничных слоев гидродинамического расчета — 0,03 мм.

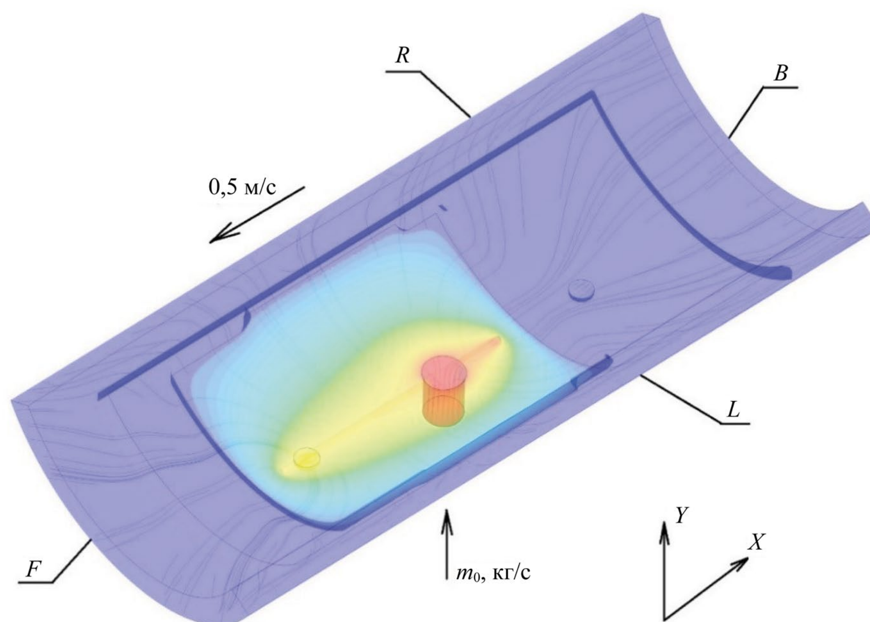


Рис. 3. Расчётная гидродинамическая модель

Исследование опиралось на следующие постулаты и допущения:

1. Пара трения ползун направляющие является плоским осевым подшипником скольжения (пята-подпятник);

2. Для обеспечения гидростатического режима смазку необходимо подавать под достаточно большими давлением, так, чтобы внешняя нагрузка уравновешивалась гидростатически. Для расчета необходимо установить, какое количество жидкости и под каким давлением нужно подавать в зазор, чтобы обеспечить оптимальную толщину смазочного слоя;

3. Делаем допущение, что подшипник плоский и клиновой, зазор не учитываем. Зазор рассматриваем как геометрический (пространство между направляющими и крейцкопфом, соответствующий посадке в рассматриваемом узле).

В качестве факторов, влияющих на обеспечение гидростатического режима для плоского подшипника скольжения, к которым можно отнести рассматриваемый узел крейцкопф-направляющие, приняты следующие параметры:

– объем смазки, находящийся в зазорах рассматриваемого узла, зависит от варианта конструкции, см^3;

– температура смазки в зоне контакта, °С;

– давление в системе смазки, МПа.

Давление смазки задавалось через расход смазки на входе системы. Для определения зависимости между этими параметрами был проведен предварительный регрессионный анализ. Давление измерялось для фиксированного объема 125 см^3 и температуры 50 °С. Результаты представлены на рис. 4.

$$P = -0{,}4501 + 5{,}5505 \cdot x$$

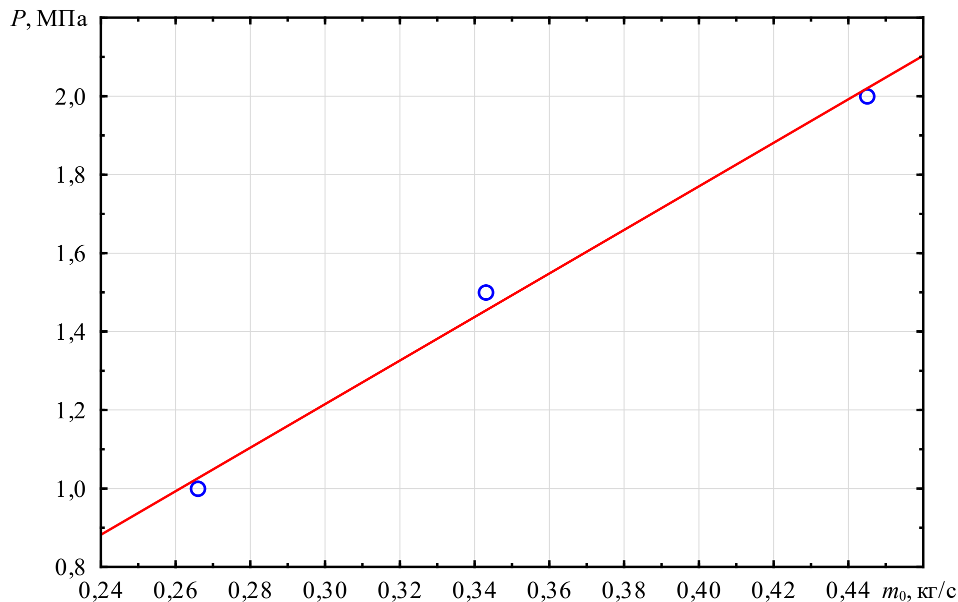


Рис. 4. Зависимость межу давлением $F_{см}$ и расходом смазки m_0 на входе в систему

Результаты, представленные на рис. 3 показывают прямопропорциональную, близкую к линейной зависимость и подтверждают корректность использования расхода смазки на входе в систему для моделирования процесса задания необходимого давления.

Для проведения полного факторного эксперимента 2^3 были определены интервалы варьирования, представленные в таблице 1, и составлена матрица планирования (таблица 2).

Выходными параметрами приняты: сила от смазочного слоя, действующая на крейцкопф $F_{кр}$, H и расход смазки на выходе из системы, определяемый как сумма жидкости, истекающей через зазоры R, B, L, F.

Таблица 1

Интервалы варьирования факторов

Уровни факторов	Факторы варьирования		
	x_1	x_2	x_3
	Вариант конструкции (объем системы смазки, см^3)	Температура, °С	Давление в системе смазки, МПа
Нижний уровень (–)	Вариант 1 (V_1 = 1,532)	20	1,0 МПа
Основной уровень (0)	Вариант 2 (V_2 = 4,125)	50	1,5 МПа
Верхний уровень (+)	Вариант 3 (V_3 = 5,475)	90	2,0 МПа

Матрица планирования и значения функции отклика представлены в таблице 2

Таблица 2

Матрица планирования 2^3 ПФЭ

Номер опыта	Входные параметры			Выходные параметры	
	x_1 Вариант конструкции (объем системы смазки, м3)	x_2 Температура, °С	x_3 Давление в системе смазки, МПа	y_1 Сила от смазочного слоя на крейцкопф $F_{см}$, кН	y_2 Расходный параметр смазки (скорость истечения через зазор), m, кг/с
1	+ Вариант 3	+ 90	+ 2,0	15,803	0,3127
2	– Вариант 1	+ 90	+ 2,0	23,278	0,2104
3	+ Вариант 3	– 20	+ 2,0	44,940	0,3139
4	– Вариант 1	– 20	+ 2,0	66,074	0,2091
5	+ Вариант3	+ 90	– 1,0	93,14	–0,1689
6	– Вариант 1	+ 90	– 1,0	14,005	0,1169
7	+ Вариант3	– 20	– 1,0	27,310	–0,1661
8	– Вариант 1	– 20	– 1,0	40,969	0,1155
9	0 Вариант 2	0 50	0 1,5	18,579	0,2756

После обработки результатов численного эксперимента, согласно представленной матрице планирования, были получены зависимости, описывающие влияние рассматриваемых факторов на исследуемые параметры:

$$y_1 = 13,298 + 3,052x_1 + 3,56x_3 - 6,5x_1x_2 + 0,9x_1x_3 - 1,65x_1x_2x_3, \quad (4)$$

$$y_2 = 0,12 + 0,14x_3 + 0,096x_1x_3. \quad (5)$$

После перехода от стандартного масштаба к натуральному, уравнения регрессии приняли следующий вид:

– уравнение, описывающее давление от смазочного слоя на крейцкопф, H:

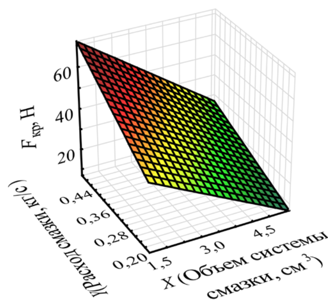
$$F_{кр} = -10,94 + 2,67V - 9,75m_0 - 26,89t - 0,004Vt + 18,46Vm_0 + 1,64m_0t - 0,398m_0Vt. \quad (6)$$

– уравнение, описывающее расход смазки (истечение через зазоры), кг/с:

$$M = 0,59 - 1,37m_0 + 0,696m_0V. \quad (7)$$

Для визуализации результатов и их дальнейшего анализа были построены графики функции силы, действующей на крейцкопф. При закреплении одного из факторов на основном уровне, полученные зависимости представлены на рис. 5.

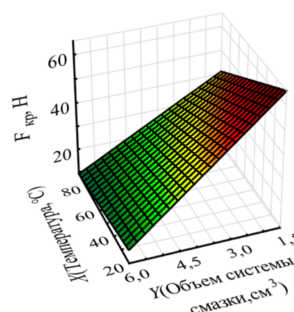
$F_{кр} = 27,908 - 6,153 \cdot x + 12,63 \cdot y + 9,85 \cdot x \cdot y$

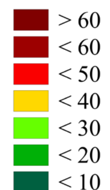




а)

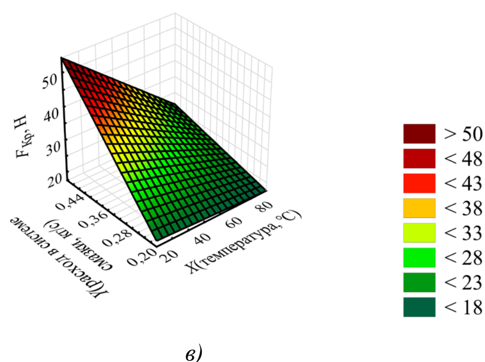
$F_{кр} = 91,229 - 0,4395 \cdot x - 12,502 \cdot y + 0,06 \cdot x \cdot y$





б)

$F_{кр} = –8,692 + 0,224 \cdot x – 142 \cdot y + 1,25 \cdot x \cdot y$



в)

Рис. 5. Зависимости значения силы, действующей на крейцкопф от смазочного слоя, при различном сочетании факторов варьирования: *а* — значение силы при t = 50 °C; *б* — значение силы при m = 0,346 кг/с; *в* — значение силы при V = 4,125 см³

График зависимости, описывающий расход смазки (истечение через зазоры) представлен на рис. 6.

$P_{см\text{-}вых} = 0,59 – 0,37 \cdot x – 0,23 \cdot y + 0,649 \cdot x \cdot y$

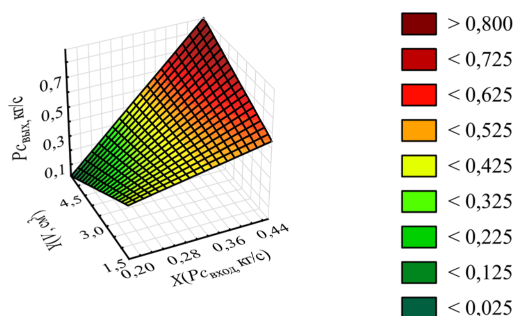


Рис. 6. Расход смазки на выходе системы (истечение через зазоры)

Также были определены зависимости массового расхода смазки на выходе системы (рис. 6) и массового расхода подачи смазочного материала (рис. 7) от объема зазоров, заполненных смазкой.

$P_c = 0,12 + 0,008 \cdot x$

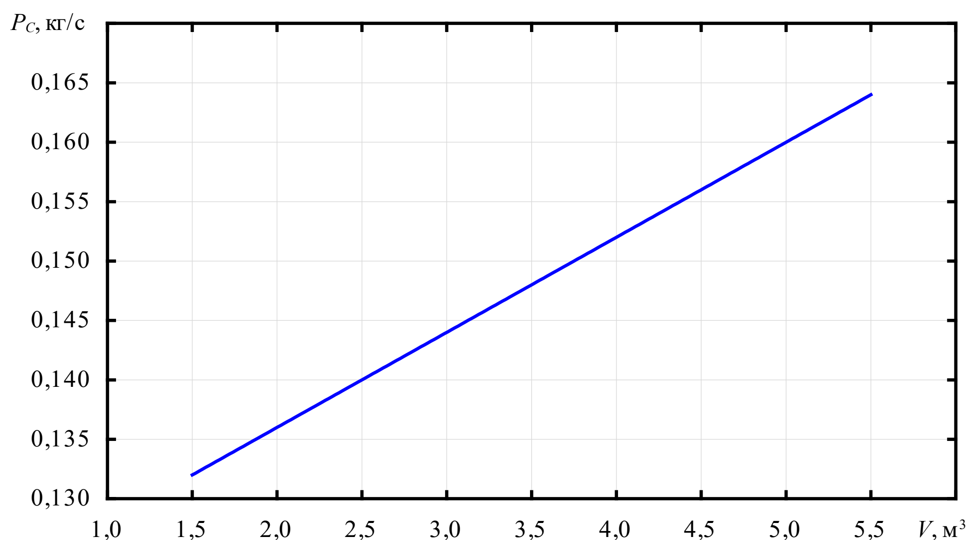


Рис. 7. Зависимость массового расхода от объема

Обсуждение и заключение. Полученная математическая модель, описывающая зависимость силы, действующей на крейцкопф от смазочного слоя, показывают, что температура не оказывает существенного влияния на рассматриваемый параметр, так как коэффициент уравнения регрессии при этом факторе признан незначимым и его влияние осуществляется только в парном взаимодействии. Это хорошо иллюстрируют рис. 5 *б, в*. Изменение объ-

ема зазоров, заполненных смазкой и массового расхода смазки на входе в систему, моделирующее увеличение давления в смазочной системе узла трения, оказывают равное влияние. Одновременное увеличение этих параметров приводит к снижению силы, действующей на крейцкопф и обеспечивающей гидростатический режим работ узла при достижении равенства значений с нормальной силой, прижимающей крейцкопф к направляющим. Определено что увеличение объема приводит к снижению давления в системе и желаемый эффект не достигается (рис. 5 *а*). При фиксировании давления в системе смазки увеличение объема зазоров, заполненных смазкой, приводит к увеличению исследуемой силы и дает положительный эффект (рис. 5 *б*). Аналогично фиксирование зазора при увеличении давления приводит к увеличению силы давления смазки на крейцкопф (рис. 5 *в*). Результаты численного эксперимента не противоречат выводам, описанным в работах, описывающих базовые уравнения гидродинамической теории смазки [9], обоснованию выбора начальных и граничных условий [10], рассматривающих различные способы подачи смазки в узел трения [16] и могут быть использованы при дальнейших исследованиях.

Уравнения, полученные для массового расхода смазки на выходе системы, определяемого как истечение ее через зазоры, показывают, что он зависит от параметров массового расхода на входе системы (подачи смазки в узел) и объемом зазоров. Другие рассматриваемые факторы не влияют на это параметр. При этом увеличение объема приводит к снижению силы, действующей на крейцкопф, а увеличение массового расхода — к ее увеличению (рис. 5). Анализ зависимости между массовым расходом смазки на выходе из системы и объемом зазоров позволяет установить, что соотношение увеличения истечения через зазоры к увеличению объема составляет приблизительно 1/2. Это показывает, что для сохранения давления в системе на том же уровне при увеличении объема зазоров, необходимо двухкратное увеличение массового расхода смазки при подаче в систему.

Для определения экстремума для каждого из рассматриваемых параметров, оказывающих влияние на процесс установления гидростатического режима и выявления оптимально значения исходных параметров работы узла, необходимо проведение эксперимента второго порядка, учитывающего выявленные в настоящей работе закономерности.

Список литературы / References

1. Eckhouse G. United States Hydraulic Fracturing's Short-Cycle Revolution and the Global Oil Industry's Uncertain Future. *Geoforum*. 2021;127:246–256. https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2021.07.010

2. Shaowen Mao, Kan Wu, George Moridis. Integrated Simulation of Three-Dimensional Hydraulic Fracture Propagation and Lagrangian Proppant Transport in Multilayered Reservoirs. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2023;410:116037. https://doi.org/10.1016/j.cma.2023.116037

3. Huiying Tang, Philip H Winterfeld, Yu-Shu Wu, Zhao-qin Huang, Yuan Di, Zhengfu Pan, et al. Integrated Simulation of Multi-Stage Hydraulic Fracturing in Unconventional Reservoirs. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2016;36A:875–892. https://doi.org/10.1016/j.jngse.2016.11.018

4. Chen Yang, Xingwen Wu, Maoru Chi, Wubin Cai, Zikui Ma, Xuesong Yao. A Load Estimation Model for Axle Box Bearings of High-Speed Trains Based on Vehicle Dynamic Response. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2024;221:111728. https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2024.111728

5. Василенко В.В., Кирищиева В.И., Мукутадзе М.А., Шведова В.Е. Исследование износостойкости подшипника скольжения с полимерным покрытием опорного кольца, имеющим канавку. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2022;22(4):365–372. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-4-365-372

Vasilenko VV, Kirishchieva VI, Mukutadze MA, Shvedova VE. Investigation of the Wear Resistance of the Journal Bearing with Polymer-Coated Grooved Support Ring. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2022;22(4):365–372. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-4-365-372

6. Polyakov RN, Savin AL. The Method of Long-Life Calculation for a Friction Couple "Rotor – Hybrid Bearing". In: *Proc. 7th International Conference on Coupled Problems in Science and Engineering.* Barcelona: CIMNE; 2017: P. 433–440. URL: https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/190572/Coupled-2017-39-The%20method%20of%20long-life.pdf?sequence=1&isAllowed=y (accessed: 20.07.2024).

7. Novotný P, Jonák M, Vacula J. Evolutionary Optimisation of the Thrust Bearing Considering Multiple Operating Conditions in Turbomachinery. *International Journal of Mechanical Sciences.* 2021;195:106240. https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2020.106240

8. Shutin DV, Polyakov RN. Active Hybrid Bearings as Mean for Improving Stability and Diagnostics of Heavy Rotors of Power Generating Machinery. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* 2020;862(3):032098. http://doi.org/10.1088/1757-899X/862/3/032098

9. Kolesnikov IV, Mukutadze AM, Avilov VV. Ways of Increasing Wear Resistance and Damping Properties of Radial Bearings with Forced Lubricant Supply. In: Radionov A, Kravchenko O, Guzeev V, Rozhdestvenskiy Y (eds). *Proc. 4th International Conference on Industrial Engineering*. Cham: Springer; 2019. P. 1049–1062. http://doi.org/10.1007/978-3-319-95630-5_110

10. Polyakov R, Majorov S, Kudryavcev I, Krupenin N. Predictive Analysis of Rotor Machines Fluid-Film Bearings Operability. *Vibroengineering Procedia*. 2020;30:61–67. http://doi.org/10.21595/vp.2020.21379

11. Hemant Kumar Gurve, Rajesh Kumar Satankar. Modal and Harmonic Analysis of Stiffened Plate Using First-Order Shear Deformation Theory. *Materials Today: Proceedings*. 2022;51(1):325–331. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.416

12. Yudakov AA. Principles of Flexible Body General Dynamic Equations Derivation Based on the Craig–Bampton Model and Their Practically Significant Ap-proximations. *Bulletin of the Udmurt University. Mathematics. Mechanics. Computer Science.* 2012;3:126–140. URL: http://vst.ics.org.ru/uploads/vestnik/3_2012/12-03-12.pdf (accessed: 20.07.2024).

13. Радченко С.Г., Лапач С.Н. Основные концепции множественного регрессионного анализа. *Математические машины и системы.* 2013;(1):150–156.

Radchenko SG, Lapach SN. Basic Concepts of Multiple Regression Analysis. *Mathematical Machines and Systems*. (In Russ.) 2013;(1):150–156.

14. Xia Tao, Jiaxiong Hao, Yu Zhang. The Uniform Convergence of a Weak Galerkin Finite Element Method in the Balanced Norm for Reaction–Diffusion Equation. *Mathematics and Computers in Simulation.* 2024;220:445–461. https://doi.org/10.1016/j.matcom.2024.02.001

15. Поляков Р.Н., Савин Л.А., Внуков А.В. Математическая модель бесконтактного пальчикового уплотнения с активным управлением зазором. *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии.* 2018;327(1):66–71.

Polyakov RN, Savin LA, Vnukov AV. Mathematical Model of the Non-Contact Finger Seal with Active Management of the Clearance. *Fundamental and Applied Problems of Technics and Technology*. 2018;327(1):66–71.

16. Kornaeva EP, Kornaev AV, Kazakov YuN, Polyakov RN. Application of Artificial Neural Networks to Diagnostics of Fluid-Film Bearing Lubrication. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* 2020;734:012154. http://doi.org/10.1088/1757-899X/734/1/012154

Об авторах:

Марина Валерьевна Корчагина, кандидат технических наук, доцент кафедры машин и оборудования нефтегазового комплекса Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), SPIN-код, ORCID, ScopusID, ResearcherID, ms.korchaginamv@mail.ru

Валентин Николаевич Степанов, старший преподаватель кафедры машин и оборудования нефтегазового комплекса Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), SPIN-код, ORCID, st_fem@bk.ru

Сергей Олегович Киреев, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой машин и оборудования нефтегазового комплекса Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), SPIN-код, ORCID, ScopusID, ResearcherID, kireevso@yandex.ru

Алексей Романович Лебедев, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры машин и оборудования нефтегазового комплекса Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), SPIN-код, ORCID, ScopusID, alex-diplom@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

М.В. Корчагина: формирование основной концепции, цели и задачи исследования, подготовка текста, анализ результатов исследований, формирование выводов.

В.Н. Степанов: проведение расчетов.

С.О. Киреев: научное руководство.

А.Р. Лебедев: доработка рисунков и текста, корректировка выводов.

Конфликт интересов: **авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Marina V. Korchagina, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Machinery and Equipment of the Oil and Gas Complex Department, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), SPIN-code, ORCID, ScopusID, ResearcherID, ms.korchaginamv@mail.ru

Valentin N. Stepanov, Senior Lecturer of the Machinery and Equipment of the Oil and Gas Complex Department, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), SPIN-code, ORCID, st_fem@bk.ru

Sergey O. Kireev, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Head of the Machinery and Equipment of the Oil and Gas Complex Department, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), SPIN-code, ORCID, ScopusID, ResearcherID, kireevso@yandex.ru

Alexey R. Lebedev, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Machinery and Equipment of the Oil and Gas Complex Department, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), SPIN-code, ScopusID, ORCID, alex-diplom@mail.ru

***Claimed Contributorship*:**

MV Korchagina: basic concept formulation, research objectives and tasks, preparation of the text, analysis of the research results, formulation of conclusions.

VN Stepanov: computational analysis.

SO Kireev: academic advising.

AR Lebedev: revision of drawings and the text, correction of the conclusions.

Conflict of Interest Statement: **the authors claimed no conflict of interest.**

All authors have read and approved the final manuscript.

Поступила в редакцию / Received 27.09.2024
Поступила после рецензирования / Reviewed 23.10.2024
Принята к публикации / Accepted 31.10.2024

МЕХАНИКА
MECHANICS





УДК 621.822.17

Оригинальное эмпирическое исследование

https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-4-328-338

Оценка износостойкости модифицированной конструкции радиального подшипника при учете сжимаемости и вязкости смазочного материала



EDN: USPXOX

Е.А. Болгова, М.А. Мукутадзе ✉, В.М. Приходько, И.А. Колобов

Ростовский государственный университет путей сообщения, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

✉ murman1963@yandex.ru

Аннотация

Введение. Актуальная проблема качества смазочных материалов обусловила как масштабные, так и узкопрофильные теоретические и прикладные исследования, которые касаются эксплуатационных свойств смазок. В частности, авторов публикаций интересует взаимодействие подшипника и смазки, так как эти элементы присутствуют во многих видах машин и оборудования. В литературе сопоставляются композиты, которыми упрочняют поверхность подшипников, определяются наиболее эффективные составы, анализируются достоинства и недостатки компонентов. По некоторым процессам рассматриваемого взаимодействия предложены и протестированы математические модели, и для некоторых из них доказана приемлемая адекватность. Однако совершенствование таких решений требует учитывать специфику трибосистемы. Данный вопрос проработан слабо, и представленная статья призвана восполнить этот пробел. При оценке износостойкости радиального подшипника принимается во внимание сжимаемость истинно вязкого смазочного материала.

Материалы и методы. Исследование базируется на схеме трибоконтакта, в которую включаются радиус вала с полимерным покрытием, радиус подшипниковой втулки, высота канавки для смазки и толщина смазочного слоя. Для создания новых математических моделей, учитывающих сжимаемость смазочного материала, авторы задействовали три уравнения: движения жидкого смазочного материала, неразрывности и состояния. Для верификации модели сопоставили итоги расчетов и лабораторных испытаний. В экспериментах использовали подшипник с канавкой для сохранения смазки. Меняли скорость его вращения, нагрузки и температурные условия. Трение измеряли традиционными методами и современными инструментами.

Результаты исследования. Конструкция подшипника модифицирована с учетом дополнительного фактора — сжимаемости смазочного материала. Новая модель на 8–10 % точнее прогнозирует несущую способность детали и на 7–9 % — коэффициент трения. Обнаружены и получили объяснение колебания коэффициента трения до 45 МПа (эквивалент пятикратного роста нагрузки). Это связано с динамическими изменениями в условиях контакта поверхностей и воздействиями внешних параметров. Определены оптимальные области применения антифрикционных покрытий на основе гибридных композиционных материалов. Расширены возможности практического использования расчетных моделей радиального подшипника скольжения. Оценены на практике его критически важные эксплуатационные характеристики.

Обсуждение и заключение. Результаты научных изысканий, описанных в данной статье, дают возможность на этапе проектирования устанавливать эксплуатационные характеристики подшипника. Выявлен значимый потенциал данного подхода в плане повышения надежности и долговечности исследованной детали, и это представляется важным шагом в развитии технологий подшипников и смазочных материалов. В перспективе авторы намерены изучить такие факторы, как температурные условия, динамические нагрузки и взаимодействие с различными смазочными материалами. Это позволит совершенствовать конструкции подшипников и расширять области их применения.

Ключевые слова: радиальный подшипник скольжения, сжимаемость смазочного материала, истинно вязкий смазочный материал, оценка износостойкости, специфика трибосистемы, гибридный композит

Благодарности. Авторы выражают благодарность руководителю лаборатории кафедры «Теоретическая механика» академику Российской академии наук Колесникову Владимиру Ивановичу за помощь в проведении экспериментальных исследований.

Для цитирования. Болгова Е.А., Мукутадзе М.А., Приходько В.М., Колобов И.А. Оценка износостойкости модифицированной конструкции радиального подшипника при учете сжимаемости и вязкости смазочного материала. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don).* 2024;24(4):328–338. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-4-328-338

Original Empirical Research

Evaluation of Wear Resistance of a Modified Radial Bearing Design Taking into Account Compressibility and Viscosity of the Lubricant

Ekaterina A. Bolgova, Murman A. Mukutadze ✉, Victor M. Prikhodko, Igor A. Kolobov
Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russian Federation
✉ murman1963@yandex.ru

Abstract

Introduction. The challenge problem of the quality of lubricants has led to both large-scale and narrow-focused theoretical and applied studies that relate to the operational properties of lubricants. In particular, the authors of the publications are interested in the interaction of bearing and lubrication, since numerous types of machinery and equipment contain these elements. In the literature, the composites used to strengthen the bearing surface are compared, the most effective compositions are determined, and the advantages and disadvantages of the components are analyzed. Mathematical models have been proposed and tested for some of the processes of the interaction under consideration, and acceptable adequacy has been proved for some of them. However, the improvement of such solutions requires taking into account the specifics of the tribosystem. This issue has been poorly worked out, and the presented article is intended to fill this gap. When evaluating the wear resistance of a radial bearing, the compressibility of a high viscosity lubricant is taken into account.

Materials and Methods. The study was based on the tribocontact scheme, which included the radius of the polymer-coated shaft, the radius of the bearing sleeve, the height of the lubrication groove, and the thickness of the lubricating layer. To create new mathematical models that took into account the compressibility of the lubricant, the authors used three equations: motion of the liquid lubricant, continuity, and state. To verify the model, the results of calculations and laboratory tests were compared. In the experiments, a bearing with a groove to preserve lubrication was used. Its rotation speed, loads and temperature conditions were changed. Friction was measured using traditional methods and modern instruments.

Results. The bearing design was modified to take into account an additional factor — the compressibility of the lubricant. The new model predicted the bearing capacity of the part by 8–10% more accurately, and the coefficient of friction — by 7–9%. Fluctuations in the coefficient of friction up to 45 MPa (equivalent to a five-fold increase in load) were detected and explained. This was due to dynamic changes in the surface contact conditions and the effects of external parameters. Optimal applications of antifriction coatings based on hybrid composite materials were determined. The possibilities of practical use of calculation models of a journal bearing were expanded. Its critically important operational characteristics were evaluated in practice.

Discussion and Conclusion. The scientific research results described in this article make it possible to establish the performance characteristics of the bearing at the design stage. The significant potential of this approach has been identified in terms of increasing the reliability and durability of the studied part, and this seems to be an important step in the development of bearing and lubricant technologies. In the future, the authors intend to study such factors as temperature conditions, dynamic loads, and interaction with various lubricants. This will allow us to improve bearing designs and expand their application areas.

Keywords: journal plain bearing, lubricant compressibility, high viscosity lubricant, wear resistance assessment, tribosystem specificity, hybrid composite

Acknowledgements. The authors would like to thank Vladimir Ivanovich Kolesnikov, Academician of the Russian Academy of Sciences, Head of the Laboratory of the Theoretical Mechanics Department, for his assistance in conducting the experimental research.

For Citation. Bolgova EA, Mukutadze MA, Prikhodko VM, Kolobov IA. Evaluation of Wear Resistance of a Modified Radial Bearing Design Taking into Account Compressibility and Viscosity of the Lubricant. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2024;24(4):328–338. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-4-328-338

Введение. Во всех отраслях экономики эффективное функционирование механизмов предполагает работу с качественными смазочными материалами. Актуальность этого вопроса стимулирует научные изыскания, которые касаются эксплуатационных свойств смазок. В частности, авторов публикаций интересует взаимодействие двух элементов, которые присутствуют во многих видах машин и оборудования. Речь идет о подшипнике и смазке. В фокусе внимания исследователей часто оказывается такой параметр смазочного материала, как сжимаемость. Строятся математические модели для определения потенциальной эффективность смазки в различных режимах работы подшипника.

При изучении смазочных материалов рабочие масла считаются несжимаемыми, однако их объем все же немного меняется. Коэффициент сжимаемости зависит от химического состава масла, его температуры, уровня давления, а также от загрязнения воздушной пеной, которая может вызвать кавитацию, снижение эффективности, падение масляного давления, образование шума и эрозии.

Современные смазочные материалы играют значительную роль в повышении ресурса опор скольжения. Достижения в области химии и материаловедения позволили создать новые виды смазок, которые существенно уменьшают трение и износ рабочих поверхностей опор подшипников, а значит, повышают работоспособность механизма. Эффект обеспечивают углеводороды и дисульфид молибдена в составе смазки. Использование таких смазочных материалов не только увеличивает надежность и долговечность опор, но и сокращает затраты на обслуживание и текущий ремонт.

Среди современных разработок в области полимерных покрытий — модификации базовых материалов для улучшения их трибологических характеристик. С этой целью в полимеры вводят наполнители [1], в том числе такие твердые смазки, как графит, дисульфид молибдена или углеродные нанотрубки [2]. Эти композиты обладают значительно более высокой износостойкостью и могут противостоять воздействиям, характерным для промышленных трибосистем [3]. Такие покрытия могут функционировать без специального смазочного материала, что значительно упрощает эксплуатацию механизмов и снижает эксплуатационные расходы.

На этапе проектирования критически важно учитывать взаимодействие различных материалов и покрытий [4], анализировать их работу под воздействием высоких температур и скоростей. При этом точность расчета параметров износа и взаимодействия поверхностей позволяет существенно повысить надежность и долговечность узлов трения [5]. В статье [6] описывается композиционная структура, особенности трения и изнашивания антифрикционного полимерного фторопластсодержащего покрытия.

Исследование [7] подтверждает, что использование резинового порошка в качестве наполнителя для эпоксидных полимеров открывает новые возможности для создания высокоэффективных вибропоглощающих композитов. Гибкость процесса позволяет менять тип, содержание и сочетание органоминеральных ингредиентов и эпоксидных компаундов. Так можно адаптировать свойства материала под конкретные требования и условия эксплуатации, что, в свою очередь, способствует улучшению производительности и долговечности оборудования.

В [8] рассматривается задача определения природы дефектов в стеклопластике. Решение [9] основывается на анализе Фурье-спектров акустоэмиссионных сигналов. Установлено, что межслоевые повреждения матриц появляются и развиваются в диапазоне частот 160–240 кГц. Это позволяет проводить раннюю диагностику и оперативно устранять такие дефекты.

Увеличение модуля Юнга в четыре раза подтверждает значимость применения мягкого шаблона с модифицированным полидопамином и дисперсионным покрытием [10]. Более высокая механическая прочность в сочетании с улучшенной теплопроводностью открывает новые перспективы для создания материалов, способных выдерживать экстремальные условия эксплуатации.

В [11] описаны возможности растворов полиэтиленоксида (ПЭО) в хлороформе. Многократное увеличение времени релаксации и растяжения указывает на качественное изменение в поведении ПЭО и открывает новые перспективы для его промышленного применения. Такие изменения могут улучшить механическую стабильность полимерных изделий, расширить диапазон их использования и повысить эффективность производственных процессов.

Как показал эксперимент [12], металлические порошки в составе покрытия улучшают адгезию с базовым материалом. Это помогает избежать отслаивания и растрескивания покрытия, что критично для долговечности и надежности тормозной передачи. В [13] установлено, что комбинированные покрытия могут стать машиностроительным стандартом — именно их будут применять в высоконагруженных и ответственных узлах.

По итогам исследований [14] можно сделать вывод, что внедрение антифрикционных полимерных композиционных покрытий с холодноотверждаемой матрицей перспективно в плане повышения надежности и эффективности промышленного оборудования.

В [15] предложена математическая модель для оценки электрофоретической подвижности, предполагающая, что наличие масштабируемой структуры адсорбированного проницаемого полимерного слоя не влияет на распределение ионов по Пуассону-Больцману в двойном электрическом слое.

Один из ключевых подходов — введение в полимеры различных наполнителей, в том числе твердых смазок. Значительно повышают износостойкость полимерных материалов такие наполнители, как графит [16], дисульфид молибдена [17] и углеродные нанотрубки [18].

В [19] исследовалось старение покрытий из плазменно-полимеризованного гексаметилдисилоксана. Их подвергли активации плазмой гелия или сухого воздуха и сравнили со старением плазменно-активированного силиконового эластомера.

Экспериментальные данные [20] свидетельствуют о том, что эксплуатационные свойства материала определяются характером акустической эмиссии. А этот показатель зависит от таких переменных, как концентрация наполнителя и температура отверждения.

Теоретические расчетные модели [21] визуализированы. Оценена их точность. С этой целью сравнивались триботехнические параметры:

– определенные по результатам численного анализа;

– рассчитанные по адекватным регрессионным моделям, полученным экспериментально.

Сопоставление доказало высокую точность моделей — в пределах 9–13 %.

Для успешного применения названных выше методов необходимо учитывать специфику каждой трибосистемы. Игнорирование этих особенностей может привести к недостоверным результатам или снижению эффективности предложенных подходов.

В литературе отмечено, что движущийся в рабочем зазоре жидкий смазочный материал содержит атмосферные газы, от которых зависит сжимаемость. Значит, ее введение в модель позволяет точнее предсказать поведение смазочного вещества и эффективность смазки в различных режимах работы подшипника. Данный вопрос недостаточно детально описан в доступных источниках, и представленная научная работа призвана восполнить этот пробел. Авторы создали и проанализировали математическую модель вязкого смазочного материала в подшипнике. Причем на опорной поверхности подшипниковой втулки было композиционное покрытие с фторопластом. Модифицированная конструкция подшипника предусматривает наличие полимерного покрытия с канавкой для лучшего распределения смазочного материала, что, в свою очередь, повышает долговечность системы. Таким образом, впервые разработана методика инженерных расчетов конструкции радиального подшипника скольжения с канавкой в полимерном покрытии. Новое решение учитывает сжимаемость смазки и позволяет определить основные триботехнические параметры. Цель работы — оценка износостойкости модифицированной конструкции радиального подшипника скольжения при учете сжимаемости истинно вязкого смазочного материала. Истинно вязкий смазочный материал — это среда, которая подчиняется закону Ньютона. Данная зависимость достаточно хорошо описывает течение многих масел при температурах, далеких от температур застывания.

Материалы и методы. Оценивается износостойкость модифицированной конструкции радиального подшипника. Параметром Ω задает скорость движения вала. При этом поверхность модифицированной втулки остается неподвижной.

Для решения задачи принята полярная система координат. Ее полюс — центр втулки (рис. 1).

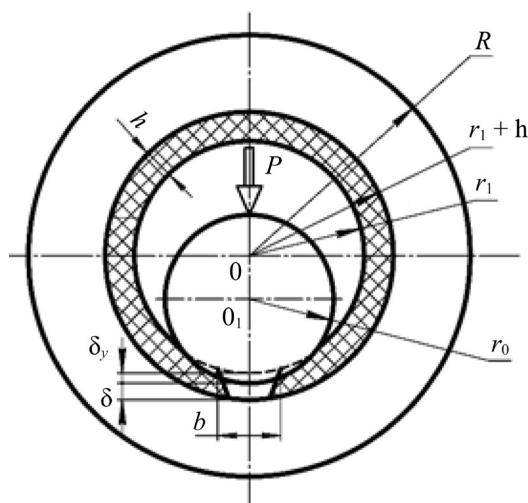


Рис. 1. Схема трибоконтакта

При этом контуры вала, втулки и модифицированной втулки описаны в виде:

$$r' = r_0\left(1+H\right),\ r' = r_1,\ r' = r_1 - \tilde{h}, \tag{1}$$

где r_0 — радиус вала с полимерным покрытием; r_1 — радиус подшипниковой втулки; $\tilde{h}$ — высота канавки; H — толщина смазочного слоя.

Вязкость смазочного материала зависит от давления:

$$\mu' = \mu_0 e^{\alpha' p'}. \tag{2}$$

Здесь μ' — коэффициент динамической вязкости смазочного материала; μ_0 — характерная вязкость; α' — постоянная; ρ' — гидродинамическое давление в смазочном слое; e — эксцентриситет.

Решение данной задачи базируется на уравнении движения жидкого смазочного материала, уравнении неразрывности и уравнении состояния:

$$\frac{\partial p_i'}{\partial r'} = 0,\ \mu'\frac{\partial^2 v_{\theta_i}}{\partial r'^2} = \frac{dp_i'}{d\theta},\ \frac{\partial\left(\rho' v_{r_i'}\right)}{\partial r'} + \frac{\rho' v_{r_i'}}{r'} + \frac{1}{r'}\frac{\partial\left(\rho' v_{\theta_i}\right)}{\partial\theta} = 0,\ p' = \frac{\lambda\Omega^2 r^2}{2}\rho', \tag{3}$$

где θ — угловая координата; v_{θ_i}, $v_{r_i'}$ — компоненты вектора скорости смазочной среды; ρ' — плотность (безразмерная величина).

Граничные условия для системы (3):

$$v_\theta = 0,\ v_{r'} = 0 \text{ при } r' = r_1,$$
$$v_\theta = v^*\left(\theta\right),\ v_{r'} = u^*\left(\theta\right) \text{ при } r' = r_1 - \tilde{h},$$
$$v_\theta = r_0\Omega,\ v_{r'}' = -\Omega e\, sin\,\theta \text{ при } r' = r_0 + e\,cos\,\theta,$$
$$p'\left(0\right) = p'\left(\theta\right) = p_g, \tag{4}$$

здесь p_g — давление подачи смазки; Ω — угловая скорость вала.

Используем формулу (5) для перехода к безразмерным переменным:

$$r' = r_1 - \delta r,\ \delta = r_1 - r_0,\ v_{\theta_i} = \Omega r_0 v_i,\ v_{r'} = \Omega\delta u_i,$$
$$p' = p^* p,\ p^* = \frac{\mu_0\Omega r_0^2}{\delta^2},\ \mu' = \mu_0\mu,\ \alpha' = \frac{\alpha}{p^*}, \tag{5}$$
$$\rho^* = \frac{2p_g}{\lambda\Omega^2 r_0^2},\ \rho' = \rho^*\rho,$$

здесь u — горизонтальная компонента скорости; v — вертикальная компонента скорости.

В результате преобразований (5) с учетом (3) и (4) получим:

$$\frac{\partial p_i}{\partial r} = 0,\ \frac{\partial^2 v_i}{\partial r^2} = \frac{1}{\Lambda}e^{-\alpha p}\frac{dp_i}{d\theta},\ \frac{\partial\left(\rho u_i\right)}{\partial r} + \frac{\partial\left(\rho v_i\right)}{\partial\theta} = 0,\ p = \rho, \tag{6}$$

$$v = 1,\ u = -\eta\, sin\,\theta \text{ при } r = 1 - \eta\, cos\,\theta = h\left(\theta\right),$$
$$v = 0,\ u = 0 \text{ при } r = 0,\ \theta_1 \le \theta \le \theta_2,$$
$$v = v^*\left(\theta\right),\ u = u^*\left(\theta\right) \text{ при } r = \eta_2,\ 0 \le \theta \le \theta_1,\ \theta_2 \le \theta \le 2\pi,$$

$$p\left(0\right) = p\left(\theta_1\right) = p\left(\theta_2\right) = p\left(2\pi\right) = \frac{p_g}{p^*},$$

$$p_3\left(\theta_2\right) = p_2\left(\theta_2\right),\ p_1\left(\theta_1\right) = p_2\left(\theta_1\right),\ Q = \text{const}, \tag{7}$$

здесь $\eta = e/\delta$ — конструктивный параметр подшипника со стандартным опорным профилем; $\eta_1 = a'/\delta$ — конструктивный параметр подшипника с адаптированным опорным профилем; $\Lambda = r_0^2\mu\Omega / p_g\delta^2$ — параметр сжимаемости.

Введем $z = e^{-\alpha p}$. После ряда преобразований получим:

$$\frac{\partial^2 v_i}{\partial r^2} = -\frac{1}{\Lambda}\frac{1}{\alpha}\frac{\partial z_i}{\partial\theta},\ \frac{\partial\left(\rho u_i\right)}{\partial r} + \frac{\partial\left(\rho v_i\right)}{\partial\theta} = 0,\ p = \rho. \tag{8}$$

Граничные условия для (8):

$$v = 1,\ u = -\eta\, sin\,\theta \text{ при } r = h\left(\theta\right),$$
$$v = 0,\ u = 0 \text{ при } r = 0,\ \theta_1 \le \theta \le \theta_2,$$
$$v = \frac{1}{h\left(\theta\right) - \eta_2},\ u = \frac{\eta\, sin\,\theta}{h\left(\theta\right) - \eta_2} \text{ при } r = \eta_2,\ 0 \le \theta \le \theta_1,\ \theta_2 \le \theta \le 2\pi,$$

$$z\left(0\right) = z\left(\theta_1\right) = z\left(\theta_2\right) = z\left(2\pi\right) = e^{-\alpha\frac{p_g}{p^*}}. \tag{9}$$

По методике [22] нашли автомодельное решение задачи (8) с учетом параметров (9):

$$\rho v_i = \frac{\partial \psi_i}{\partial r} + V_i(r,\theta),\ \rho u_i = -\frac{\partial \psi_i}{\partial \theta} + U_i(r,\theta),$$

$$\psi_i(r,\theta) = \tilde{\psi}_i(\xi_i),\ V_i(r,\theta) = p\tilde{v}_i(\xi_i),\ U_i(r,\theta) = -p\tilde{u}_i(\xi_i)\cdot h'(\theta),$$

$$\xi_i = \frac{r_i}{h(\theta)} \text{ при } \theta_1 \le \theta \le \theta_2,$$

$$\xi_i = \frac{r-\eta_2}{h(\theta)-\eta_2} \text{ при } 0 \le \theta \le \theta_1 \text{ и } \theta_2 \le \theta \le 2\pi, \qquad (10)$$

здесь ψ — функция, зависящая от автомодельной переменной ξ; V; U — составляющие поля скоростей; θ_2 — конструктивный параметр, характеризующий глубину канавки.

С учетом (10) уравнения (8) и граничные условия (9) примут вид:

$$\tilde{\psi}_i'''(\xi_i) = a_i,\ \tilde{v}_i''(\xi_i) = b_i,\ \tilde{u}_i'(\xi_i) + \frac{h(\theta)}{h'(\theta)}\frac{1}{p}\frac{dp}{d\theta} - \xi_i\tilde{v}_i'(\xi_i) = 0, \qquad (11)$$

$$e^{-\alpha p_i}\frac{p_i}{\Lambda}\frac{dp_i}{d\theta} = \frac{b_i p_i}{h^2(\theta)} + \frac{a_i}{h^3(\theta)},\ i = 1,3,$$

$$e^{-\alpha p_2}\frac{p_2}{\Lambda}\frac{dp_2}{d\theta} = \frac{b_2 p_2}{\left(h(\theta)+\tilde{h}\right)^2} + \frac{a_2}{\left(h(\theta)+\tilde{h}\right)^3},$$

$$\tilde{\psi}_\xi' = 0 \text{ при } \xi = 0,\ \xi = 1,\ \tilde{v}_i(\xi,\theta) = p,\ \tilde{u}_i = 0 \text{ при } \xi = 0,$$

$$\tilde{v}_i(\xi,\theta) = 0,\ \tilde{u}_i = -\eta\, sin\,\theta \text{ при } \xi = 1,\ \int_0^1 \tilde{v}_i(\xi)\,d\xi = 0,$$

$$p(0) = p(\theta_1) = p(\theta_2) = p(2\pi) = 1. \qquad (12)$$

С учетом (12) и (13) получим системы уравнений.

Для поля скоростей:

$$\tilde{\psi}_1'(\xi_1) = a_1\frac{\xi_1}{2}(\xi_1 - 1),\quad \tilde{v}_1(\xi_1) = b_1\frac{\xi_1^2}{2} - \left(1+\frac{b_1}{2}\right)\xi_1 + 1,$$

$$\tilde{\psi}_2'(\xi_2) = a_2\frac{\xi_2}{2}(\xi_2 - 1),\quad \tilde{v}_2(\xi_2) = b_2\frac{\xi_2^2}{2} - \left(1+\frac{b_2}{2}\right)\xi_2 + 1, \qquad (13)$$

$$\tilde{\psi}_3'(\xi_3) = a_3\frac{\xi_3}{2}(\xi_3 - 1),\quad \tilde{v}_3(\xi_3) = b_3\frac{\xi_3^2}{2} - \left(1+\frac{b_3}{2}\right)\xi_3 + 1.$$

Для гидродинамического давления:

$$p_1 = 1 + \frac{6\Lambda}{(1-\eta_2)^2}\left(\theta + 2\tilde{\eta}\,sin\,\theta - 2\frac{1-\tilde{\eta}^2}{2+\tilde{\eta}^2}\frac{1}{p}(\theta + 3\tilde{\eta}\,sin\,\theta)\right)\times\left(1 + \alpha\frac{p_g}{p^*} - \frac{\alpha^2}{2}\left(\frac{p_g}{p^*}\right)^2\right),$$

$$\tilde{\psi}_2'(\xi_2) = a_2\frac{\xi_2^2}{2} - a_2\frac{\xi_2}{2},\ \tilde{v}_2(\xi_2) = b_2\frac{\xi_2^2}{2} + \left(1-\frac{b_2}{2}\right)\xi_2 + 1,\ u_2(\xi_2) = \int_0^{\xi_2}\xi_2\tilde{v}_2'(\xi_2)\,d\xi_2,$$

$$p_2 = 1 + 6\Lambda(\theta-\theta_1)\left(1+\alpha\frac{p_g}{p^*} - \frac{\alpha^2}{2}\left(\frac{p_g}{p^*}\right)^2\right)\left[1 + \frac{2\eta}{\theta-\theta_1}(sin\,\theta - sin\,\theta_1) - \frac{1}{p}\left(1-\frac{\eta}{\theta_1}sin\,\theta_1\right)\left(1+\frac{3\eta}{\theta-\theta_1}(sin\,\theta - sin\,\theta_1)\right)\right],$$

$$\tilde{\psi}_3'(\xi_3) = a_3\frac{\xi_3^2}{2} - a_3\frac{\xi_3}{2},\ \tilde{v}_3(\xi_3) = b_3\frac{\xi_3^2}{2} + \left(1-\frac{b_3}{2}\right)\xi_3 + 1,\ u_3(\xi_3) = \int_0^{\xi_3}\xi_3\tilde{v}_3'(\xi_3)\,d\xi_3,$$

$$p_3 = 1 + \frac{6\Lambda(\theta-\theta_2)}{(1-\eta_2)^2}\left(1+\alpha\frac{p_g}{p^*} - \frac{\alpha^2}{2}\left(\frac{p_g}{p^*}\right)^2\right)\left[1 + \frac{2\tilde{\eta}}{\theta-\theta_2}(sin\,\theta - sin\,\theta_2) - \right.$$

$$\left. -\frac{1}{p}\left(1-\frac{\tilde{\eta}}{\theta_2}sin\,\theta_2\right)\left(1+\frac{3\tilde{\eta}}{\theta-\theta_2}(sin\,\theta - sin\,\theta_2)\right)\right]. \qquad (14)$$

Решим уравнение (14) методом последовательных приближений, ограничиваясь при этом двумя приближениями:

$$p_{11}=1,\quad p_{21}=1,\quad p_{31}=1,\; p_{12}=6\Lambda\left(1+\alpha\frac{p_g}{p^*}-\frac{\alpha^2}{2}\left(\frac{p_g}{p^*}\right)^2\right)\frac{6\Lambda}{\left(1-\eta_2\right)^2}\left(\theta+2\tilde{\eta}\,sin\,\theta-2\frac{1-\tilde{\eta}^2}{2+\tilde{\eta}^2}\left(\theta+3\tilde{\eta}\,sin\,\theta\right)\right),$$

$$p_{22}=+6\Lambda\left(\theta-\theta_1\right)\left(1+\alpha\frac{p_g}{p^*}-\frac{\alpha^2}{2}\left(\frac{p_g}{p^*}\right)^2\right)\left[1+\frac{2\eta}{\theta-\theta_1}\left(sin\,\theta-sin\,\theta_1\right)-\left(1-\frac{\eta}{\theta_1}sin\,\theta_1\right)\left(1+\frac{3\eta}{\theta-\theta_1}\left(sin\,\theta-sin\,\theta_1\right)\right)\right],$$

$$p_{32}=\frac{6\Lambda\left(\theta-\theta_2\right)}{\left(1-\eta_2\right)^2}\left(1+\alpha\frac{p_g}{p^*}-\frac{\alpha^2}{2}\left(\frac{p_g}{p^*}\right)^2\right)\left[1+\frac{2\tilde{\eta}}{\theta-\theta_2}\left(sin\,\theta-sin\,\theta_2\right)-\right.$$

$$\left.-\left(1-\frac{\tilde{\eta}}{\theta_2}sin\,\theta_2\right)\left(1+\frac{3\tilde{\eta}}{\theta-\theta_2}\left(sin\,\theta-sin\,\theta_2\right)\right)\right]. \quad (15)$$

Для определения несущей способности и силы трения используем формулу (15):

$$R_x=\frac{6\mu_0 r_0^3\Omega}{2\delta^2}\left[\int_0^{\theta_1}p_{12}\,cos\,\theta d\theta+\int_{\theta_1}^{\theta_2}p_{22}\,cos\,\theta d\theta+\int_{\theta_2}^{2\pi}p_{32}\,cos\,\theta d\theta\right],$$

$$R_y=\frac{6\mu_0\omega r_0^3}{2\delta^2}\left[\int_0^{\theta_1}p_{12}\,sin\,\theta d\theta+\int_{\theta_1}^{\theta_2}p_{22}\,sin\,\theta d\theta+\int_{\theta_2}^{2\pi}p_{32}\,sin\,\theta d\theta\right],$$

$$L_{\text{ТР}}=\mu\left(1+\alpha p-\frac{\alpha^2}{2}p^2\right)\left[\int_0^{\theta_1}\frac{1}{p}\left(\frac{\tilde{\psi}_1''(0)}{h^2(\theta)}+\frac{\tilde{v}_1'(0)}{h(\theta)}\right)d\theta+\right.$$

$$\left.+\int_{\theta_1}^{\theta_2}\frac{1}{p}\left(\frac{\tilde{\psi}_2''(0)}{\left(h(\theta)+\tilde{h}\right)^2}+\frac{\tilde{v}_2'(0)}{\left(h(\theta)+\tilde{h}\right)^3}\right)d\theta+\int_{\theta_2}^{2\pi}\frac{1}{p}\left(\frac{\tilde{\psi}_3''(0)}{h(\theta)}+\frac{\tilde{v}_3'(0)}{h(\theta)}\right)d\theta\right]. \quad (16)$$

Данные исследования установили эффективность предложенной теоретической модели в указанных диапазонах параметров. Значения параметра сжимаемости Λ = 0,1–0,9 и напряжения σ в диапазоне 9–45 МПа тщательно протестировали, чтобы убедиться в точности модели и возможности ее широкого применения.

Условия экспериментов. Исследование началось с верификации разработанной расчетной модели. Для этого проводились численные расчеты, которые позволили оценить основные параметры функционирования подшипника. Верификация включала сопоставление этих расчетных данных с результатами лабораторных испытаний. Анализ показал, что расчетная модель с высокой степенью точности предсказывает поведение конструкции. При этом выявленные отклонения находятся в пределах допустимой погрешности.

Эксперименты для подшипника с контуром маслоподдерживающей канавки проводились при различных режимах работы. В частности, менялись скорость вращения, нагрузки и температурные условия. Верный выбор режима обеспечивает уменьшение износа и усиление тепловыделения. Такой подход позволяет повысить надежность и сократить простои в работе механизмов.

В испытаниях задействовали традиционные методы измерения трения и износа, а также современные инструментальные подходы. Это обусловило высокую точность измерений и помогло более глубоко понять механизмы трения и износа в новой конструкции.

Результаты исследования. Исследование позволило более точно представить рабочие характеристики подшипников с полимерным покрытием (таблица 1). Это имеет большое значение для их эффективного применения в различных инженерных системах. Благодаря новой модели прогнозирование данных о несущей способности оказалось точнее на 8–10 %, о коэффициенте трения — на 7–9 %.

Таблица 1

Результаты теоретического исследования

№	σ, МПа	Параметр сжимаемости				
		0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
		Коэффициент трения				
1	9	0,00479000	0,00711300	0,00310000	0,00100000	0,00023000
2	18	0,00149000	0,00149100	0,00165300	0,00008500	0,00049350
3	27	0,00017300	0,00009200	0,00000600	0,00005050	0,00002700
4	36	0,00007500	0,00014130	0,00000400	0,00001160	0,00000793
5	45	0,00000100	0,00001070	0,00000100	0,00002700	0,00000687

Эксперимент показал наличие колебаний коэффициента трения. Это связано с динамическими изменениями в условиях контакта поверхностей и воздействиями внешних параметров. Такое поведение коэффициента трения при росте нагрузки указывает на сложность взаимодействий в системе, особенно с учетом максимального зафиксированного показателя нагрузки. Он достигал 45 МПа, что эквивалентно ступенчатому увеличению нагрузки в 5 раз (таблица 2).

Таблица 2

Сравнение результатов теоретического исследования и эксперимента

№ п/п	Режим		Коэффициент трения		
			Теоретическое исследование		Эксперимент
	σ, МПа	*V*, м/с	Покрытие	С учетом сжимаемости	
1	9	0,3	0,0105	0,0103	0,0104
2	18	0,3	0,0095	0,0093	0,0094
3	27	0,3	0,0090	0,0088	0,0090
4	36	0,3	0,0085	0,0080	0,0082
5	45	0,3	0,0075	0,0071	0,0074

Результаты научных изысканий подтверждают эффективность разработанных теоретических моделей. Их внедрение открывает возможность значительно усилить нагрузочную способность деталей и существенно снизить коэффициент трения. Итоги работы можно представить в двух пунктах.

1. Исследования радиальных подшипников скольжения с учетом сжимаемости жидкого смазочного материала, во-первых, показали значительное улучшение их эксплуатационных характеристик. Во-вторых, точность инженерных расчетов для несущей способности увеличилась на 8–10 %, а для коэффициента трения — на 7–9 %.

2. Значительно расширены возможности практического использования расчетных моделей радиального подшипника скольжения. Оценены на практике его критически важные эксплуатационные характеристики.

Обсуждение и заключение. Результаты научной работы, описанной в данной статье, позволяют устанавливать основные эксплуатационные характеристики подшипника на этапе проектирования. Возможность повышать надежность и долговечность исследованной детали — важный шаг в развитии технологий подшипников и смазочных материалов.

Новая методика базируется на теоретической основе и получила экспериментальное подтверждение. Она предназначена для разработки расчетных моделей радиальных подшипников скольжения. Важная характеристика детали — антифрикционное полимерное покрытие с канавкой для сохранения смазочной жидкости. Принимаются во внимание сжимаемость и реологические свойства смазочного материала. С учетом ранее установленных параметров таких канавок создана расчетная модель, детально описывающая поведение подшипника в гидродинамическом режиме. Особое внимание уделено сжимаемости истинно вязкого смазочного материала, параметры вязкости которого зависят от давления и условий трения. Сформулированы рекомендации по использованию подшипников с оптимальными канавками.

Сфера применения результатов работы — инженерные проектировочные и проверочные расчеты при необходимости поддерживать гидродинамический режим смазки. Методика потенциально востребована в машиностроении, авиастроении, приборостроении и других отраслях.

В дальнейших исследованиях представляется целесообразным изучить такие факторы, как температурные условия, динамические нагрузки и взаимодействие с различными смазочными материалами. Это позволит совершенствовать конструкции подшипников и расширять области их применения.

Список литературы / References

1. Глушко С.П. Исследование технологии электроискрового нанесения покрытий, легирования и упрочнения. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don).* 2021;21(3):253–259. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-3-253-259

Glushko SP. Investigation of the Electrospark Coating, Alloying and Strengthening Technology. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don).* 2021;21(3):253–259. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-3-253-259

2. Тамаркин М.А., Тищенко Э.Э., Верченко А.В., Троицкий В.М. Формирование качества поверхностного слоя при абразивной обработке полимеркомпозитных материалов. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don).* 2020;20(3):235–242. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2020-20-3-235-242

Tamarkin MA, Tishchenko EhEh, Verchenko AV, Troitskii VM. Formation of Surface Layer Quality under Abrasive Treatment of Polymer-Composite Materials. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don).* 2020;20(3):235–242. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2020-20-3-235-242

3. Негматов С.С., Абед Н.С., Саидахмедов Р.Х, Ульмасов Т.У., Григорьев А.Я., Сергиенко В.П. и др. Исследование вязкоупругих и адгезионно-прочностных свойств и разработка эффективных вибропоглощающих композиционных полимерных материалов и покрытий машиностроительного назначения. *Пластические массы*. 2020;(7–8):32–36. https://doi.org/10.35164/0554-2901-2020-7-8-32-36

Negmatov SS, Abed NS, Saidakhmedov RKh, Ulmasov TU, Grigoriev AYa, Sergienko VP, et al. Research of Viscoelastic and Adhesion-Strength Property and Development of Effective Vibration Absorbing Composite Polymeric Materials and Coatings of Mechanical Engineering Purpose. *Plasticheskie massy.* 2020;(7–8):32–36. https://doi.org/10.35164/0554-2901-2020-7-8-32-36

4. Павлычева Е.А. Разработка полимерной композиции для получения защитного покрытия на металлических поверхностях. *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2022;(2):33–36. https://doi.org/10.17513/mjpfi.13355

Pavlycheva EA. Development of Polymer Composition for Obtaining a Protective Coating on Metal Surfaces. *International Journal of Applied and Fundamental Research.* 2022;(2):33–36. https://doi.org/10.17513/mjpfi.13355

5. Харламов П.В. Применение физико-химического подхода для изучения механизма образования вторичных структур фрикционного переноса на поверхности контртела. *Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения*. 2021;83(3):37–44. https://doi.org/10.46973/0201-727X_2021_3_37

Kharlamov PV. Application of the Physico-Chemical Approach to Study the Mechanism of Formation of Secondary Frictional Transfer Structures on the Control Surface. *Vestnik RGUPS.* 2021;83(3):37–44. https://doi.org/10.46973/0201-727X_2021_3_37

6. Кохановский В.А., Петров Ю.А. Трение и изнашивание фторопластсодержащих композитов. *Вестник Донского государственного технического университета*. 2009;9(1):30–35.

Kohanovsky VA, Petroff IA. Friction and Wear of Composites with Polytetrafluorethilene. *Vestnik of Don State Technical University*. 2009;9(1):30–35.

7. Петухов Д.С., Адамов А.А., Келлер И.Э. Выбор и идентификация модели упруговязкопластичности наполненного фторкомпозита по данным испытаний на свободное и стесненное сжатие. *Advanced Engineering Research* (*Rostov-on-Don*). 2022;22(3):180–192. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-3-180-192

Petukhov DS, Adamov AA, Keller IE. Selection and Identification of a Model of Elasto-Viscoplasticity of the Filled Fluorocomposite according to Free and Constrained Compression Tests. *Advanced Engineering Research* (*Rostov-on-Don*). 2022;22(3):180–192. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-3-180-192

8. Брянский А.А., Башков О.В., Белова И.В., Башкова Т.И. Исследование развивающихся повреждений при изгибном нагружении полимерных композиционных материалов и их идентификация методом акустической эмиссии. *Вектор науки Тольяттинского государственного университета*. 2022;(2):7–16. https://doi.org/10.18323/2782-4039-2022-2-7-16

Bryansky AA, Bashkov OV, Belova IV, Bashkova TI. Investigation of Damages Formed in Polymer Composite Materials under Bending Loading and Their Identification by the Acoustic Emission Technique. *Frontier Materials and Technologies*. 2022;(2):7–16. https://doi.org/10.18323/2782-4039-2022-2-7-16

9. Shizheng Wen, Si-Dan Zhong, Wei-Qiu Kan, Pu-Su Zhao, Yuan-Chun He. Experimental and Theoretical Investigation on the Hydrochromic Property of Ni(II)-Containing Coordination Polymer with an Inclined 2D→3D Polycatenation Architecture. *Journal of Molecular Structure*. 2022;1269(12):133753. https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2022.133753

10. Liyuan Jin, Wenjing Cao, Pei Wang, Na Song, Peng Ding. Interconnected MXene/Graphene Network Constructed by Soft Template for Multi-Performance Improvement of Polymer Composites. *Nano-Micro Letters*. 2022;14:133. https://doi.org/10.1007/s40820-022-00877-7

11. Robertson BP, Calabrese MA. Evaporation-Controlled Dripping-onto-Substrate (DoS) Extensional Rheology of Viscoelastic Polymer Solutions. *Scientific Reports*. 2022;12(1):4697. https://doi.org/10.1038/s41598-022-08448-x

12. Иваночкин П.Г., Больших И.В., Талахадзе Т.З., Больших Е.П. Применение антифрикционных полимерных композиционных покрытий в тормозной рычажной передаче локомотивов. *Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения*. 2022;85(1):16–22. https://doi.org/10.46973/0201-727X_2022_1_16

Ivanochkin PG, Bolshikh IV, Talakhadze TZ, Bolshikh EP. Application of Antifriction Polymer Composite Coatings in the Brake Lever Transmission of Locomotive. *Vestnik RGUPS*. 2022;85(1):16–22. https://doi.org/10.46973/0201-727X_2022_1_16

13. Ivanochkin PG, Manturov DS, Danilchenko SA, Karpenko KI. Study on the Effect of the Sealers on the Steel Surface Layer Modified by Electrical Discharge Machining. *Solid State Phenomena*. 2021;316:713–719. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.316.713

14. Брянский А.А., Башков О.В. Идентификация источников акустической эмиссии в полимерном композиционном материале в условиях циклического растяжения. *Вектор науки Тольяттинского государственного университета*. 2021;(3):19–27. https://doi.org/10.18323/2073-5073-2021-3-19-27

Bryansky AA, Bashkov OV. Identification of Acoustic Emission Sources in a Polymer Composite Material under the Cycle Tension Loading. *Frontier Materials and Technologies.* 2021;(3):19–27. https://doi.org/10.18323/2073-5073-2021-3-19-27

15. Santanu Saha, Yasuhisa Adachi. Shielding Behavior of Electrokinetic Properties of Polystyrene Latex Particle by the Adsorption of Neutral Poly(ethylene Oxide). *Journal of Colloid and Interface Science*. 2022;626:930–938. https://doi.org/10.1016/j.jcis.2022.06.154

16. Кохановский В.А., Камерова Э.А. Фторопластсодержащие композиционные покрытия в смазочных средах. *Трение и смазка в машинах и механизмах*. 2014;(1):34–37.

Kohanovsky VA, Kamerova EA. Composites Cover Content Fluor Ethylene in the Liquid Lubricants. *Friction & Lubrication in Machines and Mechanisms.* 2014;(1):34–37.

17. Кохановский В.А., Камерова Э.А. Трение полимерных покрытий в жидких смазочных средах. *Трение и смазка в машинах и механизмах*. 2014;(4):17–20.

Kohanovsky VA, Kamerova EA. Friction of the Polymeric Cover in the Liquid Lubricants. *Friction & Lubrication in Machines and Mechanisms.* 2014;(4):17–20.

18. Камерова Э.А., Власенко И.Б., Снежина Н.Г., Оганесян П.А. Методика исследования влияния жидких сред на фторопластсодержащие антифрикционные покрытия. *Уральский научный вестник*. 2014;100(21);137–142.

Kamerova EA, Vlasenko IB, Snezhina NG, Oganesyan PA. Methodology for Studying the Effect of Liquid Media on Fluoroplastic-Containing Antifriction Coatings. *Ural'skii nauchnyi vestnik*. 2014;100(21);137–142. (In Russ.)

19. Egghe T, Ghobeira R, Morent R, Hoogen-Boom R, De Geyter N. Comparative Study of the Aging Behavior of Plasma Activated Hexamethyldisiloxane-Based Plasma Polymers and Silicone Elastomer Thin Films. *Progress in Organic Coatings*. 2022;172:107091. https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2022.107091

20. Peng Hu, Ru Xie, Qingyi Xie, Chunfeng Ma, Guangzhao Zhang. Simultaneous Realization of Antifouling, Self-Healing, and Strong Substrate Adhesion via a Bioinspired Self-Stratification Strategy. *Chemical Engineering Journal*. 2022;449:137875. https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.137875

21. Хасьянова Д.У., Мукутадзе М.А. Установление закономерности повышения износостойкости модифицированного радиального подшипника скольжения. *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2023;(2):71–81. https://doi.org/10.31857/S0235711923010066

Khasyanova DU, Mukutadze MA. The Regularity of Increasing the Wear Resistance of a Modified Radial Slide Bearing. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability.* 2023;(2):71–81. https://doi.org/10.31857/S0235711923010066

22. Кирищиева В.И., Лагунова Е.О., Мукутадзе М.А. Повышение износостойкости радиального подшипника с нестандартным опорным профилем и полимерным покрытием на поверхности вала. *Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета*. 2023;27(2):15–23. https://doi.org/10.54708/19926502_2023_27210015

Kirishchieva VI, Lagunova EO, Mukutadze MA. Increasing the Wear Resistance of the Radial Bearing with a Non-Standard Support Profile and Polymer Coating on the Shaft Surface. *Vestnik UGATU*. 2023;27(2):15–23. https://doi.org/10.54708/19926502_2023_27210015

Об авторах:

Екатерина Александровна Болгова, аспирант кафедры высшей математики Ростовского государственного университета путей сообщения (344038, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2), SPIN-код, ORCID, ScopusID, bolgova_katya6@mail.ru

Мурман Александрович Мукутадзе, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой высшей математики Ростовского государственного университета путей сообщения (344038, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2), SPIN-код, ORCID, ResearcherID, murman1963@yandex.ru

Виктор Маркович Приходько, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой начертательной геометрии и графики Ростовского государственного университета путей сообщения (344038, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2), SPIN-код, ORCID, ScopusID, ResearcherID, v.m.prikhodko@yandex.ru

Игорь Анатольевич Колобов, кандидат технических наук, доцент, декан факультета управления процессами перевозок Ростовского государственного университета путей сообщения (344038, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2), SPIN-код, ORCID, ScopusID, upp@rgups.ru

Заявленный вклад авторов:

Е.А. Болгова: расчеты, подготовка текста, корректировка выводов.
М.А. Мукутадзе: научное руководство, анализ результатов исследований, доработка текста.
В.М. Приходько: формирование основной концепции, цели и задачи исследования.
И.А. Колобов: проведение эксперимента, формирование выводов.

Конфликт интересов: **авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

***About the Authors*:**

Ekaterina A. Bolgova, Postgraduate student of the Higher Mathematics Department, Rostov State Transport University (2, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolchenia sq., Rostov-on-Don, 344038, Russian Federation), SPIN-code, ORCID, ScopusID, bolgova_katya6@mail.ru

Murman A. Mukutadze, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Head of the Higher Mathematics Department, Rostov State Transport University (2, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolchenia sq., Rostov-on-Don, 344038, Russian Federation), SPIN-code, ORCID, ResearcherID, murman1963@yandex.ru

Victor M. Prikhodko, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Head of the Descriptive Geometry and Engineering Graphics Department, Rostov State Transport University (2, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolchenia sq., Rostov-on-Don, 344038, Russian Federation), SPIN-code, ORCID, ScopusID, ResearcherID, v.m.prikhodko@yandex.ru

Igor A. Kolobov, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor, Dean of the Transportation Management Faculty, Rostov State Transport University (2, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolchenia sq., Rostov-on-Don, 344038, Russian Federation), SPIN-code, ORCID, ScopusID, upp@rgups.ru

Claimed Contributorship:
EA Bolgova: computational analysis, text preparation, correction of the conclusions.
MA Mukutadze: academic advising, analysis of the research results, revision of the text.
VM Prikhodko: basic concept formulation, research objectives and tasks.
IA Kolobov: testing, formulation of conclusions.

***Conflict of Interest Statement*: the authors declare no conflict of interest.**

All authors have read and approved the final version of the manuscript.

Поступила в редакцию / Received 01.10.2024
Поступила после рецензирования / Reviewed 23.10.2024
Принята к публикации / Accepted 31.10.2024

МЕХАНИКА
MECHANICS





УДК 534.1, 539.3, 539.5
https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-4-339-346

Оригинальное теоретическое исследование

Конечно-элементное моделирование плоской ячейки высокопористого пьезокомпозита с наклонными ребрами с учетом неоднородной поляризации


EDN: BNDEOI

А.Н. Соловьев[1,2] ✉, **М.С. Германчук**[2,3]
[1] Южный Федеральный Университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация
[2] Крымский инженерно-педагогический университет имени Февзи Якубова, г. Симферополь, Республика Крым
[3] Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, г. Симферополь, Республика Крым
✉ solovievarc@gmail.com

Аннотация

Введение. Высокопористые композиты — металлические пены — находят широкое применение в силу своих механических свойств. В литературе представлены различные методы их математического моделирования, в том числе, на основе периодических ячеек Гибсона-Эшби. Пьезоактивные композиты обладают рядом свойств, таких как высокая чувствительность сенсоров и широкая полоса пропускания. Этим обусловлен интерес к их моделированию. Однако при построении таких моделей из пьезокерамических материалов возникает определенная трудность, связанная с выбором распределения предварительной поляризации. Следует отметить, что этот вопрос, особенно для высокопористой пьезокерамики, недостаточно изучен в литературе. Поэтому целью данной работы являлось установление влияния модели поляризации на характеристики пьезоактивного композита.

Материалы и методы. Материал конструкции — пьезокерамика PZT-4, поляризация которой существенно зависит от условий ее наведения (геометрии модели, расположения электродов). Исследование разделено на два шага: в первом проводится расчет остаточной поляризации на основе теории известной в литературе, реализация которой осуществлена в пакете ACELAN; на втором решается ряд задач для ячейки композита и находится зависимость ее свойств от модели поляризации. В качестве метода решения соответствующих краевых задач электроупругости для кусочно-неоднородных тел используется метод конечных элементов, реализованный в пакете ACELAN.

Результаты исследования. Решена задача определения неоднородной поляризации для двух видов конструкций плоских ячеек высокопористой пьезокерамики. Отмечены некоторые особенности полученного распределения поляризации, в частности, ее неоднородность и наличие встречной поляризации в некоторых ребрах. Решены задачи определения собственных частот и форм колебаний «внутри ячейки» и их зависимость от модели поляризации (однородной и неоднородной). Отмечается, что некоторые частоты отличаются на 10 %, а формы колебаний качественно совпадают. Проанализирована зависимость напряженно деформированного состояния и выходных характеристик от поляризации, разница некоторых значений которых достигала 15 %.

Обсуждение и заключение. Процесс поляризации высокопористых пьезокерамик имеет ряд особенностей, которые необходимо учитывать для получения достоверных сведений о ее механическом и электрическом поведении. Ауксетические свойства, разница в механическом и электрическом отклике рассматриваемой ячейки напрямую связаны с этими особенностями. Таким образом модель поляризации оказывает существенное влияние на характеристики пьезоактивного композита, что определяет важность ее правильного выбора. Полученные результаты надо учитывать при моделировании представительных объемов высокопористых пьезоэлектрических композитов для определения их эффективных свойств, на основе которых строятся модели пьезоэлектрических устройств и рассчитываются их выходные характеристики.

Ключевые слова: высокопористая пьезокерамика, неоднородная поляризация, плоская ячейка, метод конечных элементов

Благодарности. Авторы выражают благодарность редакции журнала и рецензентам за внимательное отношение к статье.

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РНФ (№ 22–11–00302) в Южном федеральном университете, https://rscf.ru/project/22-11-00302/

Для цитирования. Соловьев А.Н., Германчук М.С. Конечноэлементное моделирование плоской ячейки высокопористого пьезокомпозита с наклонными ребрами с учетом неоднородной поляризации. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don).* 2024;24(4):339–346. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-4-339-346

Original Theoretical Research

Finite Element Modeling of a Flat Cell of Highly Porous Piezocomposite with Inclined Edges Taking into Account Nonuniform Polarization

Arkadiy N. Soloviev[1,2] ✉, **Maria S. Germanchuk**[2,3]

[1] Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russian Federation

[2] Crimean Engineering and Pedagogical University named after Fevzi Yakubov, Simferopol, Republic of Crimea

[3] V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Republic of Crimea

✉ solovievarc@gmail.com

Abstract

Introduction. Highly porous composites — metal foams — are widely used due to their mechanical properties. The literature presents various methods for their mathematical modeling, including those based on periodic Gibson-Ashby cells. Piezoactive composites have a number of properties, such as high sensor sensitivity and a large bandwidth. This is the reason for the interest in their modeling. However, when constructing such models from piezoceramic materials, a certain difficulty, associated with the selection of the distribution of preliminary polarization, arises. It should be noted that this issue, specifically for highly porous piezoceramics, has not been sufficiently studied in the literature. Therefore, the objective of this work was to establish the effect of the polarization model on the characteristics of the piezoactive composite.

Materials and Methods. The design material is PZT-4 piezoceramics, whose polarization depends significantly on the conditions of its guidance (model geometry, electrode arrangement). The study was divided into two steps: in the first, the residual polarization was calculated based on the theory known in the literature, the implementation of which was performed in the ACELAN package; in the second, a number of problems for a composite cell were solved, and the dependence of its properties on the polarization model was found. The finite element method implemented in the ACELAN package was used as a method for solving the corresponding boundary value problems of electroelasticity for piecewise inhomogeneous bodies.

Results. The problem of determining nonuniform polarization for two types of flat cell designs of highly porous piezoceramics was solved. Some features of the obtained polarization distribution were noted, in particular, its nonuniformity and the presence of counter polarization in some edges. The problems of determining natural frequencies and vibration modes "intra cell" and their dependence on the polarization model (homogeneous and nonhomogeneous) were solved. It was noted that some frequencies differed by 10%, while the vibration modes qualitatively coincided. The dependence of the stress-strain state and output characteristics on polarization, whose difference in some values reached 15%, was analyzed.

Discussion and Conclusion. The process of polarization of highly porous piezoceramics has a number of features that must be taken into account to obtain reliable information about its mechanical and electrical behavior. Auxetic properties, the difference in the mechanical and electrical response of the cell in question are directly related to these features. Thus, the polarization model has a significant impact on the characteristics of the piezoactive composite, which determines the importance of its correct selection. The results obtained should be taken into account when modeling representative volumes of highly porous piezoelectric composites to determine their effective properties, on the basis of which models of piezoelectric devices are constructed, and their output characteristics are calculated.

Keywords: highly porous piezoceramics, nonuniform polarization, flat cell, finite element method

Acknowledgements. The authors would like to thank the Editorial board and the reviewers for their attentive attitude towards the article.

Funding Information. The research was done with the financial support from the Russian Science Foundation (no. 22–11–00302) at the Southern Federal University, https://rscf.ru/project/22-11-00302/

For Citation. Soloviev AN, Germanchuk MS. Finite Element Modeling of a Flat Cell of Highly Porous Piezocomposite with Inclined Edges Taking into Account Nonuniform Polarization. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don).* 2024;24(4):339–346. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-4-339-346

Введение. Одним из типов высокопористого композита является материал, построенный на основе ячеек Гибсона-Эшби [1]. В работе [2] проведена оценка эффективного модуля Юнга пористого титана с открытыми порами на основе трехмерного массива таких ячеек. Сравнение механического поведения моделей пен, составленных из регулярных и нерегулярных массивов открытых ячеек Гибсона–Эшби осуществляется в работе [3]. На рис. 1 *а* представлена открытая ячейка, на рис. 1 *б* и 1 *в* — модифицированные модели Гибсона-Эшби с наклонными ребрами для функционально-градиентных решетчатых структур [4].

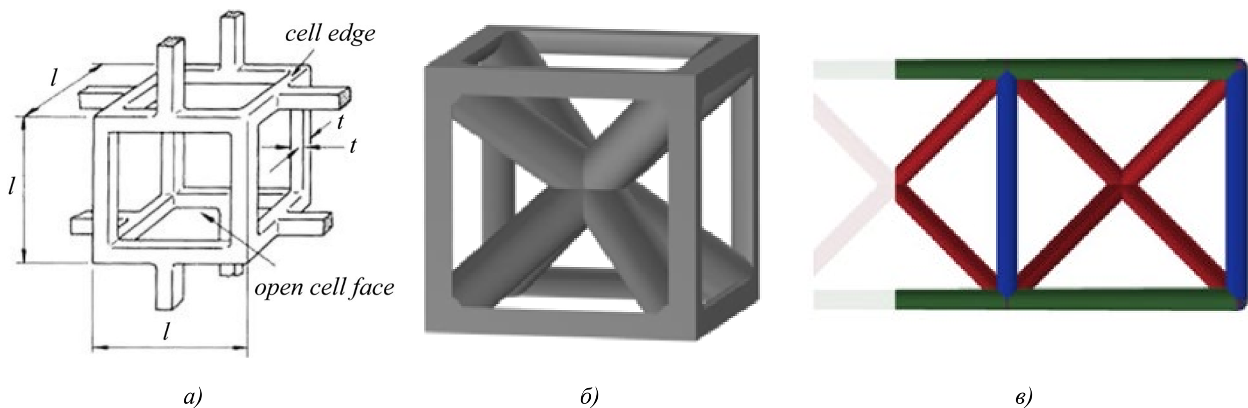


Рис. 1. Схемы ячеек высокопористого композита: *а* — ячейка Гибсона-Эшби;
б — ячейка с наклонными ребрами; *в* — плоская ячейка с наклонными ребрами [4]

Методы гомогенизации, которые используются при моделировании эффективных свойств композитов рассматриваются в монографиях [5, 6]. Исследования высокопористых структур, таких как, пенообразные, клеточные, ячеистые и сотовые представлены в монографиях [7, 8], в обзорах [9–12] и др. В работе [13] экспериментально и теоретически рассматривается поляризация пористой пьезокерамики и на основе модельного примера теоретически объясняются особенности некоторых ее эффективных свойств, о чем сказано выше. Вопрос об эффективных свойствах высокопористых пьезоэлектрических композитов в научной литературе изучен недостаточно. Это связано в первую очередь с тем, что определенную трудность составляет процесс описания поляризации таких структур. Целью данной работы явилось изучение влияния модели поляризации на напряженно-деформированное состояние ячейки и на эффективные свойства таких композитов. Рассматривается две модели: в первой предполагается однородная поляризация; во второй — распределение поляризации рассчитывается с помощью известных в литературе методов и программного обеспечения, среди разработчиков которого есть один из авторов данной работы. В работе показано, что выбор модели поляризации существенно влияет на механические свойства высокопористых пьезоэлектрических композитов.

Материалы и методы

Математическая постановка задачи. Рассматриваются плоские ячейки, которые являются элементами конструкций, представленных на рис. 1. Материал ячеек — пьезокерамика PZT-4, описываемая в рамках линейной теории электроупругости [14], в однородном случае — поляризованная по вертикальной оси, в неоднородном случае — распределение поляризации находится по теории, предложенной в работе [15] и реализованной в конечно-элементном пакете ACELAN [16].

Материалы. На рис. 2 *а* представлена геометрия плоской ячейки, соответствующая схеме на рис. 1 *а* с наклонными ребрами, толщина ребер составляет 1 мм, внешний размер 10×10 мм. На рис. 2 *б* представлена схема неоднородной поляризации для такой конструкции, когда электроды расположены на внешних торцах верхнего и нижнего вертикальных ребер. Особенностью этой поляризации является ее неоднородность на наклонных ребрах и наличие встречных ее направлений на верхнем и нижнем горизонтальных ребрах. На рис. 2 *в* представлена схема поляризации для элемента композита, периодичность которого осуществляется через вертикальные и горизонтальные ребра. Особенностью поляризации этого элемента является практически неполяризованные горизонтальные ребра.

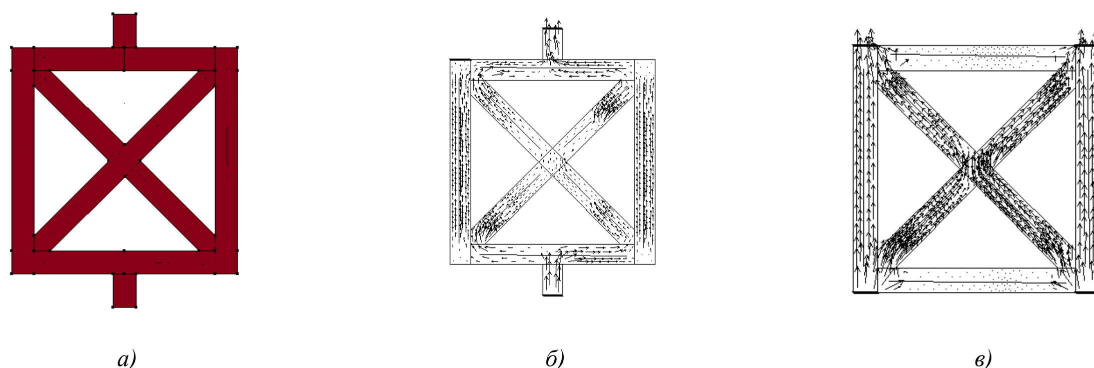


Рис. 2. Схемы ячеек и поляризации высокопористого композита:
а — однородная поляризация; *б* — неоднородная при электродах на нижнем и верхнем ребрах;
в — неоднородная при электродах внизу и вверху на вертикальных ребрах

Методы. В качестве метода расчета напряженно-деформированного состояния ячеек используется метод конечных элементов (МКЭ), реализованный в пакете ACELAN [16].

Результаты исследования. Вначале исследуются собственные частоты и формы колебаний «внутри» ячейки, представленной на рис. 1 *в* и 2 *в*. При этом ячейка закрепляется в углах по нормали на толщину горизонтальных и вертикальных ребер, что соответствует периодичности структуры композита. В таблице 1 представлены собственные резонансные частоты для однородной и неоднородной поляризации (рис. 2 *в*), на рис. 3–5 — собственные формы колебаний на этих частотах.

Таблица 1

Собственные частоты для однородной и неоднородной поляризации

Номер частоты \ Поляризация	Собственные частоты в Гц	
	Однородная	Неоднородная
1	$0{,}43455 \times 10^5$	$0{,}41271 \times 10^5$
2	$0{,}47277 \times 10^5$	$0{,}47249 \times 10^5$
3	$0{,}54538 \times 10^5$	$0{,}49562 \times 10^5$
4	$0{,}61497 \times 10^5$	$0{,}58611 \times 10^5$
5	$0{,}67255 \times 10^5$	$0{,}67607 \times 10^5$

Для неоднородной поляризации 1, 3 и 4 собственные частоты ниже, чем для однородной, но формы колебаний 1–5 качественно совпадают. Поэтому на рис. 3–5 представлены собственные формы для ячейки с однородной поляризацией. На рис. 3 *а, б* представлено распределение горизонтальных смещений и вертикальных смещений для первой формы колебаний. На рис. 4 *а, б* представлены распределения для второй формы колебаний горизонтальных смещений и для третьей формы колебаний вертикальных смещений соответственно. На рис. 5 *а, б* представлено распределение модуля смещений на четвертой и пятой модах соответственно.

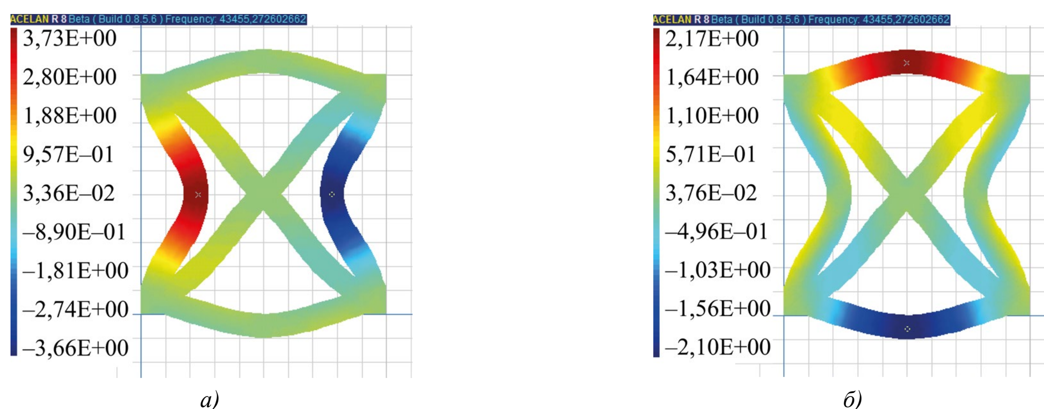


Рис. 3. Первая форма колебаний однородная поляризация: *а* — распределение горизонтальных смещений;
б — распределение вертикальных смещений

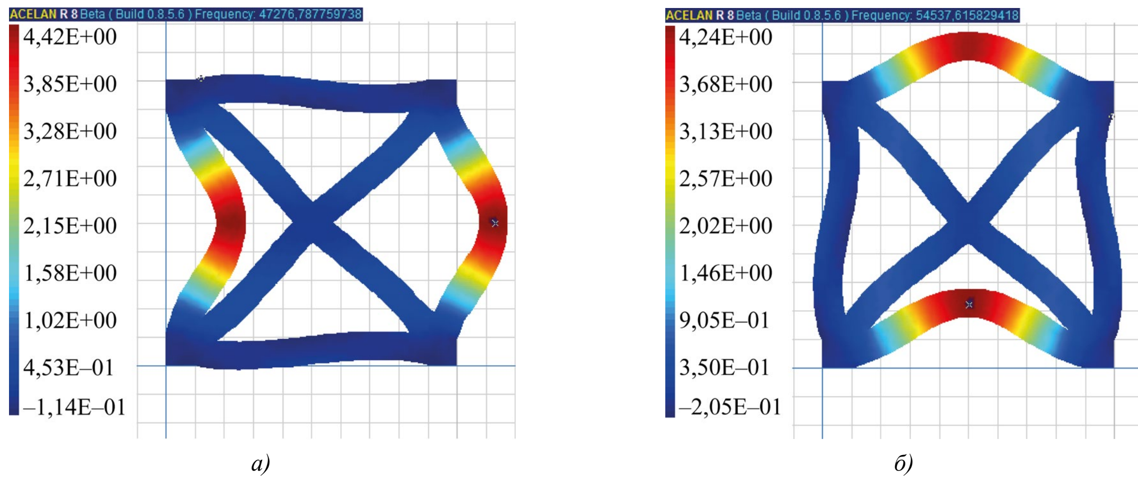


Рис. 4. Формы колебаний однородная поляризация: *а* — вторая, распределение горизонтальных смещений; *б* — третья, распределение вертикальных смещений

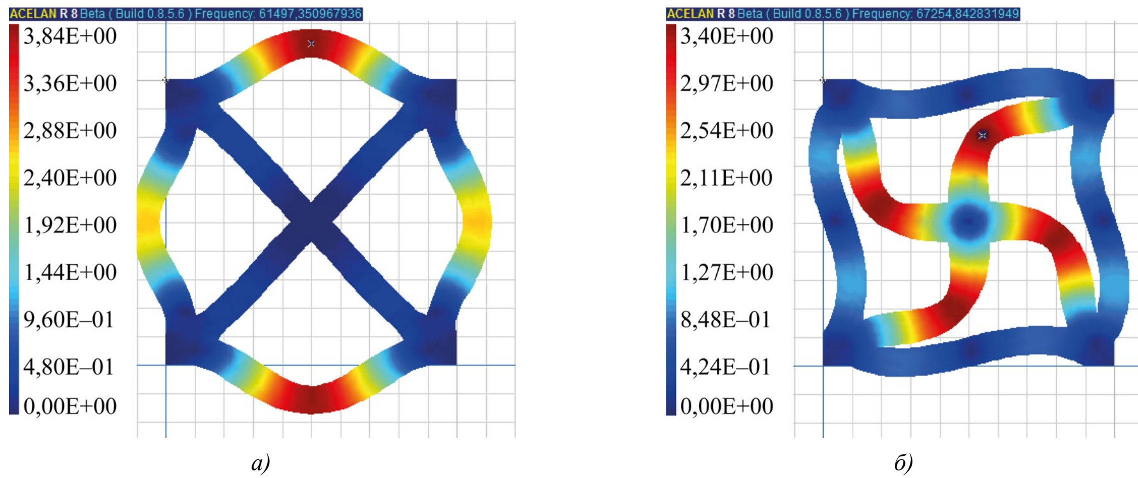


Рис. 5. Формы колебаний с распределением модуля перемещений для однородной поляризации: *а* — четвертая мода; *б* — пятая мода

При продольном в вертикальном направлении растяжении-сжатии этой ячейки в структуре композита (моделируется свободной всей верхней поверхностью и приложением равномерного давления на верхний торец вертикальных ребер) смещение в случае однородной поляризации на 15 % больше (рис. 6 *а*). Потенциал на свободных электродах на 3 % больше в случае неоднородной поляризации. Следует отметить, что касательные напряжения (рис. 6 *б*) в случае неоднородной поляризации больше на 10 %. Коэффициент электромеханической связи для 7-ой моды колебаний (рис. 6 *в*) на 14 % процентов больше для однородной поляризации ячейки.

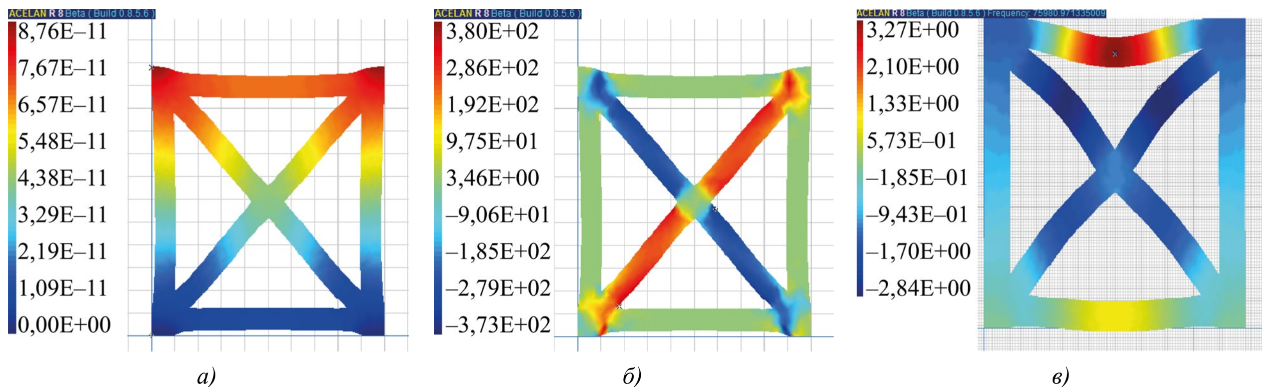


Рис. 6. При действии вертикального давления распределение: *а* — вертикального смещения; *б* — касательных напряжений; *в* — распределение вертикального смещения на 7 моде колебаний

Расчеты для ячейки, представленной на рис. 2 *а* и 2 *б,* показали, что вертикальное смещение (рис. 7 *а*) при действии давления на торец верхнего стержня в случае неоднородной поляризации на 11 % больше. В статике, при действии разности потенциалов на нижнем и верхнем торцах, ячейка проявляет свойства ауксетика, что связано со встречной поляризацией (рис. 2 *б*) горизонтальных ребер. На рис. 7 *б* и 7 *в* приведены распределения вертикального и горизонтального смещений. Видно, что при растяжении по вертикали происходит расширение ячейки и по горизонтали.

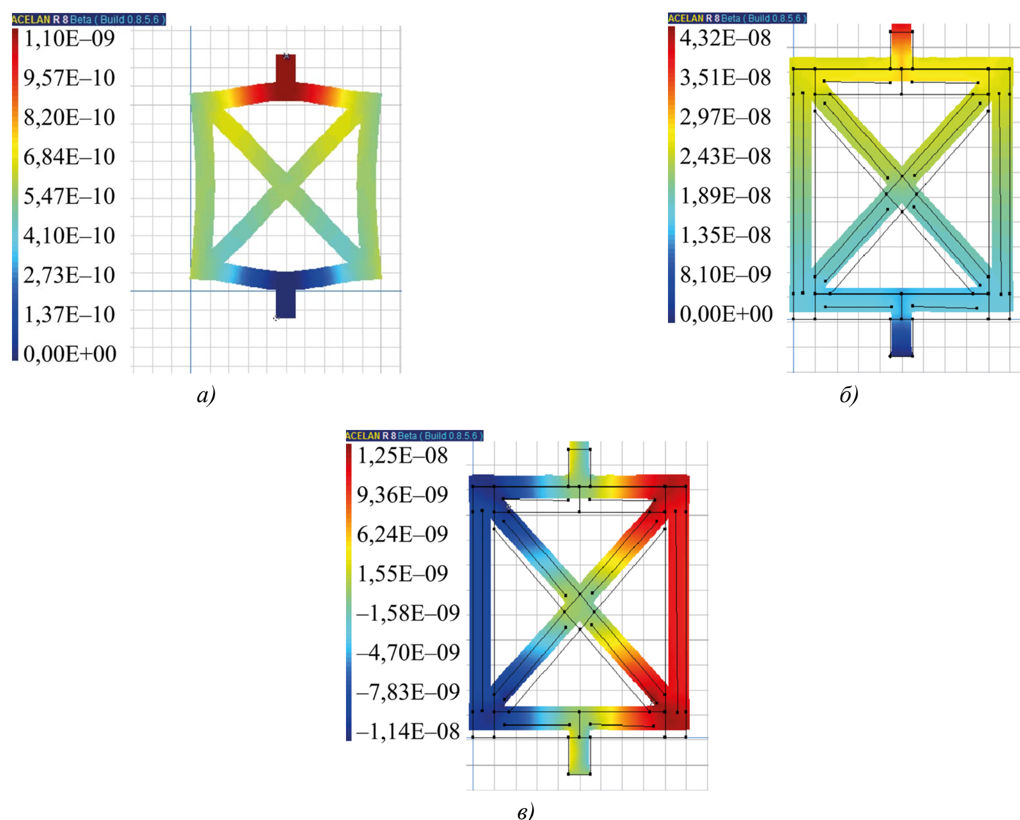


Рис. 7. Распределение: *а* — вертикального смещения при действии вертикального давления; *б* — вертикального смещения при действии разности потенциалов; *в* — горизонтального смещения при действии разности потенциалов

Обсуждение и заключение. Таким образом, на основе этого НДС находятся эффективные свойства композитов, которые используются при моделировании пьезоэлекрических устройств, поэтому исследование влияния вида поляризации на НДС высокопористого пьезоактивного материала весьма актуально.

Расчет поля предварительной поляризации в ячейке высокопористого материала показал, что оно существенно зависит от ее геометрии и расположения электродов. К этим особенностям относится то, что некоторые ребра практически не поляризованы, другие поляризованы в одном направлении, но неоднородно и, наконец, могут появиться ребра со встречной поляризацией. Расчет механического и электрического отклика ячейки и собственных резонансных частот показал, что учет неоднородности поляризации приводит к тому, что величина расхождения этих результатов с результатами для модели с однородной поляризацией достигает 15 % и 10 % соответственно. А ячейка, с ребрами на которых есть встречная поляризация, проявляет ауксетические свойства. В работе показано, что в задачах определения эффективных свойств высокопористых пьезоэлектрических композитов на основе построения представительных объемов из его ячеек существенным является учет соответствующей их структуре неоднородной поляризации.

Практическая значимость полученных результатов связана с тем, что с помощью эффективных свойств композитов на этапе проектирования проводится моделирование, расчет и оптимизация различных пьезоэлектрических устройств (датчиков, излучателей и приемников акустических волн, пьезоэлектрических генераторов и др.).

Список литературы / References

1. Gibson LJ, Ashby MF. The Mechanics of Three-Dimensional Cellular Materials. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences.* 1982;382:43–59. https://doi.org/10.1098/rspa.1982.0088

2. Никитин А.В., Михасёв Г.И. Оценка эффективного модуля Юнга пористого титана с открытыми порами на основе трехмерного массива ячеек Гибсона-Эшби. *Журнал Белорусского государственного университета. Математика. Информатика.* 2022;(1):75–82. https://doi.org/10.33581/2520-6508-2022-1-75-82

Nikitin AV, Mikhasev FI. Estimation of the Effective Young's Modulus for Open Cell Porous Titanium Based on 3D Gibson-Ashby Cell Array. *Journal of the Belarusian State University. Mathematics and Informatics*. 2022;(1):75–82. https://doi.org/10.33581/2520-6508-2022-1-75-82

3. Корниевский А.С., Наседкин А.В. Сравнение моделей пен, составленных из регулярных и нерегулярных массивов открытых ячеек Гибсона-Эшби. *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика.* 2021;(3):70–83. https://doi.org/10.15593/perm.mech/2021.3.07

Kornievsky AS, Nasedkin AV. Comparison of Foam Models from Regular and Irregular Arrays of Gibson-Ashby Open-Cells. *PNPRU Mechanics Bulletin*. 2021;(3):70–83. https://doi.org/10.15593/perm.mech/2021.3.07

4. Seyed Kamal Jalali, Mohammad Javad Beigrezaee, Diego Misseroni, Nicola Maria Pugno. A Modified Gibson-Ashby Model for Functionally Graded Lattice Structures. *Mechanics of Materials.* 2024;188:104822. https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2023.104822

5. Kachanov M, Sevostianov I. *Micromechanics of Materials, with Applications*. Cham: Springer; 2018. 712 p. https://doi.org/10.1007/978-3-319-76204-3

6. Milton GW. *The Theory of Composites*. Cambridge: Cambridge University Press; 2002. 568 p. https://doi.org/10.1017/CBO9780511613357

7. Scheffler M, Colombo P. (eds) *Cellular Ceramics: Structure, Manufacturing, Properties and Applications*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons; 2005. 645 p. http://doi.org/10.1002/3527606696

8. Gibson LJ, Ashby MF. *Cellular Solids: Structure and Properties.* 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press; 1997. 510 p. https://doi.org/10.1017/CBO9781139878326

9. Hössinger-Kalteis A, Reiter M, Jerabek M, Major Z. Overview and Comparison of Modelling Methods for Foams. *Journal of Cellular Plastics.* 2021;57(6):951–1001. https://doi.org/10.1177/0021955X20966329

10. Chen Pan, Yafeng Han, Jiping Lu. Design and Optimization of Lattice Structures: A Review. *Applied Sciences.* 2020;10(18):6374. https://doi.org/10.3390/app10186374

11. Srivastava V, Srivastava R. On the Polymeric Foams: Modeling and Properties. *Journal of Materials Science.* 2014;49:2681–2692. https://doi.org/10.1007/s10853-013-7974-5

12. Firooz S, Steinmann P, Javili A. Homogenization of Composites with Extended General Interfaces: Comprehensive Review and Unified Modeling. *Applied Mechanics Reviews.* 2021;73(4):040802. https://doi.org/10.1115/1.4051481

13. Вернигора Г.Д., Лупейко Т.Г., Скалиух А.С., Соловьёв А.Н. О поляризации и определении эффективных характеристик пористой пьезокерамики. *Вестник Донского государственного технического университета.* 2011;11(4):462–469. URL: https://www.vestnik-donstu.ru/jour/article/view/746/745 (дата обращения: 28.08.2024).

Vernigora GD, Lupeiko TG, Skaliukh AS, Solovyev AN. On Polarization and Identification of Porous Piezoceramics Effective Characteristics. *Vestnik of Don State Technical University.* 2011;11(4):462–469. URL: https://www.vestnik-donstu.ru/jour/article/view/746/745 (accessed: 28.08.2024).

14. Белоконь А.В., Еремеев В.А., Наседкин А.В., Соловьев А.Н. Блочные схемы метода конечных элементов для динамических задач акустоэлектроупругости. *Прикладная математика и механика.* 2000;64(3):381–393.

Belokon' AV, Eremeyev VA, Nasedkin AV, Solovyev AN. Partitioned Schemes of the Finite-Element Method for the Dynamic Problems of Acoustoelectroelasticity. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics.* 2000;64(3):381–393.

15. Белоконь А.В., Скалиух А.С. *Математическое моделирование необратимых процессов поляризации.* Москва: Физмалит; 2010. 328 с.

Belokon AV, Skaliukh AS. *Mathematical Modeling of Irreversible Polarization Processes*. Moscow: Fizmatlit; 2010. 328 p. (In Russ.)

16. Skaliukh AS, Oganesyan PA, Soloviev AN. Modeling of Piezoelectric Elements with Inhomogeneous Polarization in ACELAN. *Ferroelectrics.* 2015;483(1):95–101. https://doi.org/10.1080/00150193.2015.1059138

Об авторах:

Аркадий Николаевич Соловьев, доктор физико-математических наук, профессор кафедры математики и физики Крымского инженерно-педагогического университета имени Февзи Якубова (295015, Республика Крым, г. Симферополь, пер. Учебный, д. 8), главный научный сотрудник Южного федерального университета (344006, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая, 105/42), SPIN-код, ORCID, ScopusID ResearcherID, solovievarc@gmail.com

Мария Сергеевна Германчук, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры информатики Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского, (295007, Республика Крым, г. Симферополь, пр. Вернадского, д. 4), доцент кафедры математики и физики Крымского инженерно-педагогического университета имени Февзи Якубова (295015, Республика Крым, г. Симферополь, пер. Учебный, 8), SPIN-код, ORCID, ScopusID, ResearcherID, m.german4uk@yandex.ru

Заявленный вклад авторов:

А.Н. Соловьев: формулировка идеи и исследовательских целей и задач, применение математических методов анализа и синтеза данных исследования, разработка вспомогательных алгоритмов.

М.С. Германчук: проведение исследовательского процесса, а именно, проведение численного эксперимента в пакете ACELAN, подготовка и создание черновика рукописи, доработка текста.

Конфликт интересов: **авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Arkadiy N. Soloviev, Dr.Sci. (Phys.-Math.), Professor of the Mathematics and Physics Department, Crimean Engineering and Pedagogical University named after Fevzi Yakubov (8, Uchebnyi Lane, Simferopol, 295015, Republic of Crimea), Chief Researcher, Southern Federal University (105/42, Bolshaya Sadovaya Str., Rostov-on-Don, 344006, Russian Federation), SPIN-code, ORCID, ScopusID ResearcherID, solovievarc@gmail.com

Maria S. Germanchuk, Cand.Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor of the Informatics Department, V.I. Vernadsky Crimean Federal University (4, Prospect Vernadskogo, Simferopol, 295007, Republic of Crimea), Associate Professor of the Mathematics and Physics Department, Crimean Engineering and Pedagogical University named after Fevzi Yakubov (8, Uchebnyi Lane, Simferopol, 295015, Republic of Crimea), SPIN-code, ORCID, ScopusID, ResearcherID, m.german4uk@yandex.ru

Claimed Contributorship:

AN Soloviev: formulation of the idea and research objectives and tasks, application of mathematical methods of analysis and synthesis of research data, development of auxiliary algorithms.

MS Germanchuk: conducting the research process, namely, performing a numerical experiment in the ACELAN package, preparing and creating a draft manuscript, finalizing the text.

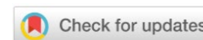
Conflict of Interest Statement: **the authors declare no conflict of interest.**

All authors have read and approved the final version of the manuscript.

Поступила в редакцию / Received 14.10.2024
Поступила после рецензирования / Reviewed 30.10.2024
Принята к публикации / Accepted 08.11.2024

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE





УДК 621.018.2
https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-4-347-359

Оригинальное эмпирическое исследование

Стенд испытания поршневых гидравлических цилиндров с рекуперацией энергии: структура, моделирование и расчёт



EDN: BQOJNU

А.Р. Зенин, А.Т. Рыбак ✉, А.Н. Бескопыльный, А.Ю. Пелипенко, Ю.А. Сердюкова
Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация
✉ 2130373@mail.ru

Аннотация
Введение. Во всем мире энергосбережение является актуальной проблемой для исследований в области машиностроения. Особое направление в этих исследованиях — поиск энергоэффективных методов испытаний технических систем, которые позволяют наиболее точно прогнозировать надёжность проектируемого оборудования. Установленная техническими условиями и ГОСТами длительность ресурсных испытаний приводит к безвозвратной потере энергии, составляющей более чем 1,5 ресурса испытуемой машины, теряемая же при этом энергия в виде «вредного тепла» выделяется в окружающую среду. Поэтому проблеме энергосбережения в процессе испытаний уделяется особое внимание. Одним из путей энергосбережения при испытаниях гидравлических машин является рекуперация энергии. Однако в работах, посвящённых рекуперации энергии при испытаниях гидравлических машин, решались задачи рекуперации энергии при испытаниях гидромашин вращательного действия, а для гидромашин возвратно-поступательного действия была решена задача рекуперации энергии при испытаниях плунжерных гидравлических цилиндров. Результаты этих исследований не могут напрямую использоваться для испытаний поршневых гидроцилиндров. В связи с этим сформулирована цель настоящей работы — разработка структуры и принципиальной схемы стенда испытаний поршневых гидроцилиндров, обеспечивающего рекуперацию части энергии, затрачиваемой на испытания, за счёт чего энергетическая эффективность процесса испытаний значительно повышается.
Материалы и методы. В работе использовались методы моделирования процесса функционирования стенда на основе применения теории объёмной жёсткости. Для проведения предварительных расчётов процесса функционирования стенда разработана компьютерная программа на базе программного комплекса SimInTech.
Результаты исследования. Разработаны структурная и принципиальная схемы стенда испытания поршневых гидравлических цилиндров. Получено математическое выражение, позволяющее дать предварительную оценку коэффициенту эффективности испытаний. Создана компьютерная программа на базе программного комплекса SimInTech, дающая возможность конструктивным параметрам стенда влиять на его эксплуатационные характеристики, включая коэффициент энергетической эффективности процесса испытания.
Обсуждение и заключение. Проведенные предварительные расчёты характеристик функционирования стенда показали, что коэффициент эффективности предлагаемого стенда составляет 1,7. Его можно повысить за счет проведения дополнительных исследований, направленных на получение рациональных конструктивных параметров стенда. Предложенный стенд обеспечивает испытания поршневых гидравлических цилиндров с рекуперацией части затраченной энергии, а его математическая модель позволяет использовать при расчётах численные методы. Это значительно упрощает процесс расчётов и повышает их точность. При этом получать рациональные параметры стенда можно уже на стадии его проектирования, не прибегая к дорогостоящим и трудозатратным натурным исследованиям.

Ключевые слова: математическое моделирование, поршневые гидравлические цилиндры, стенд для испытания, рекуперация энергии, коэффициент эффективности испытания

Благодарности. Авторы выражают благодарность редакции и рецензентам за внимательное отношение к статье и указанные замечания, устранение которых позволило повысить ее качество.

Для цитирования. Зенин А.Р., Рыбак А.Т., Бескопыльный А.Н., Пелипенко А.Ю., Сердюкова Ю.А. Стенд испытания поршневых гидравлических цилиндров с рекуперацией энергии: структура, моделирование и расчёт. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don).* 2024;24(4):347–359. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-4-347-359

Original Empirical Research

Testing Bench for Reciprocating Hydraulic Cylinders with Energy Recovery: Structure, Simulation, and Calculation

Alexander R. Zenin, **Alexander T. Rybak** ✉, **Alexey N. Beskopylny**, **Alexey Yu. Pelipenko**, **Yuliya A. Serdyukova**
Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation
✉ 2130373@mail.ru

Abstract
Introduction. Energy conservation is an urgent topic of research in the field of mechanical engineering all over the world. A particular direction in these studies is the search for energy-efficient methods of testing technical systems, which allow the most accurate prediction of the reliability of the designed equipment. The duration of resource tests established by technical conditions and GOSTs causes an irreversible loss of energy, amounting to more than 1.5 resource of the tested machine, and the energy lost in the form of "harmful heat" is released into the environment. Therefore, the problem of energy saving during testing is given special attention. One of the ways of energy saving under testing of hydraulic machines is energy recovery. However, in papers devoted to energy recovery during testing of hydraulic machines, the problems of energy recovery during testing of rotary hydraulic machines were solved, and for reciprocating hydraulic machines, the problem of energy recovery during testing of plunger hydraulic cylinders was solved. The results of these studies cannot be directly used for testing reciprocating hydraulic cylinders. In this regard, the objective of this work has been formulated — to develop the structure and basic scheme of a test bench for reciprocating hydraulic cylinders, providing the recovery of part of the energy spent on testing, due to which the energy efficiency of the testing process is significantly increased.
Materials and Methods. The paper used methods for modeling the process of stand functioning based on the application of the theory of volumetric rigidity. To carry out preliminary calculations of the stand operation process, a computer program based on the SimInTech software package was developed.
Results. A structural and schematic diagram of a test bench for reciprocating hydraulic cylinders has been developed. A mathematical expression has been obtained that provides a preliminary assessment of the test efficiency coefficient. A computer program based on the SimInTech software package has been created, which allows the design parameters of the stand affect its operational characteristics, including the coefficient of energy efficiency of the test process.
Discussion and Conclusion. The preliminary calculations of the operating characteristics of the stand showed that the efficiency coefficient of the proposed stand was 1.7. It can be increased by conducting additional studies aimed at obtaining rational design parameters of the stand. The proposed stand provides testing of reciprocating hydraulic cylinders with recovery of part of the expended energy, and its mathematical model allows using the numerical methods in calculations. This significantly simplifies the calculation process and increases the accuracy of the calculations. At the same time, it is possible to obtain rational parameters of the stand already at the design stage, without resorting to expensive and labor-intensive field studies.

Keywords: mathematic simulation, reciprocating hydraulic cylinders, test bench, energy recovery, test efficiency coefficient

Acknowledgements. The authors would like to thank the Editors and reviewers for their attentive attitude to the article and the comments indicated, the elimination of which allowed us to improve the quality of the paper.

For Citation. Zenin AR, Rybak AT, Beskopylny AN, Pelipenko AYu, Serdyukova YuA. Testing Bench for Piston Hydraulic Cylinders with Energy Recovery: Structure, Simulation, and Calculation. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don).* 2024;24(4):347–359. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-4-347-359

Введение. Наиболее важными показателями качества современной машиностроительной продукции являются её надёжность и энергоэффективность. Надёжность обеспечивается на различных этапах жизненного цикла изделия [1]: на этапах теоретических исследований [2], разработки [3], производства [4] и эксплуатации [5]. Энергоэффективность имеет большое значение при эксплуатации постоянно действующих приводов технологических [6], транспортных [7], погрузочно-разгрузочных машин [8], гидрофицированных экскаваторов [9] и других машин и механизмов. Особое значение экономия энергии приобретает при эксплуатации высоконагруженных машин [10], их испытании [11] и диагностике [12].

В настоящее время при проведении испытаний гидравлических машин часто используются системы нагружения в формате нагрузочных устройств, потребляющих значительное количество энергоресурсов гидравлического или механического типа, неэффективно используемых и в итоге теряемых безвозвратно.

Одним из важнейших направлений усовершенствования и разработки новых систем испытания гидравлических машин является уход от традиционных систем нагружения гидравлических двигателей (механических, гидравлических, электрических и др. тормозных систем), которые вызывают значительные непроизводительные потери энергии, к системам с рекуперацией энергии.

Поэтому вопрос обеспечения рекуперации энергии в процессе испытаний является актуальным направлением повышения энергосбережения гидравлических машин. Весьма перспективным в этом случае является схема стенда испытания гидравлических машин вращательного действия [13], который может быть использован в качестве системы нагружения рекуперативной системы типа «насос – мотор – насос» при испытании гидравлических машин возвратно-поступательного движения.

Схема рекуперативной системы типа «насос – мотор – насос» представлена на рис. 1. В этой системе рекуперации энергия испытания, переданная от гидронасоса гидромотору, посредством механической передачи II возвращается от мотора на вал насоса, что значительно снижает её непроизводительные потери в процессе испытания. В таком случае нагрузкой для насоса служит мотор, а нагрузкой для мотора служит насос. Теряемая на преодоление внутренних сопротивлений системы испытания энергия компенсируется электрическим двигателем посредством механической передачи I.

На основе использования рекуперативной системы типа «насос – мотор – насос» [14] разработан стенд испытания гидравлических машин возвратно-поступательного движения (плунжерных гидравлических цилиндров) [15], позволяющий значительно экономить энергию в процессе испытания плунжерных гидравлических цилиндров.

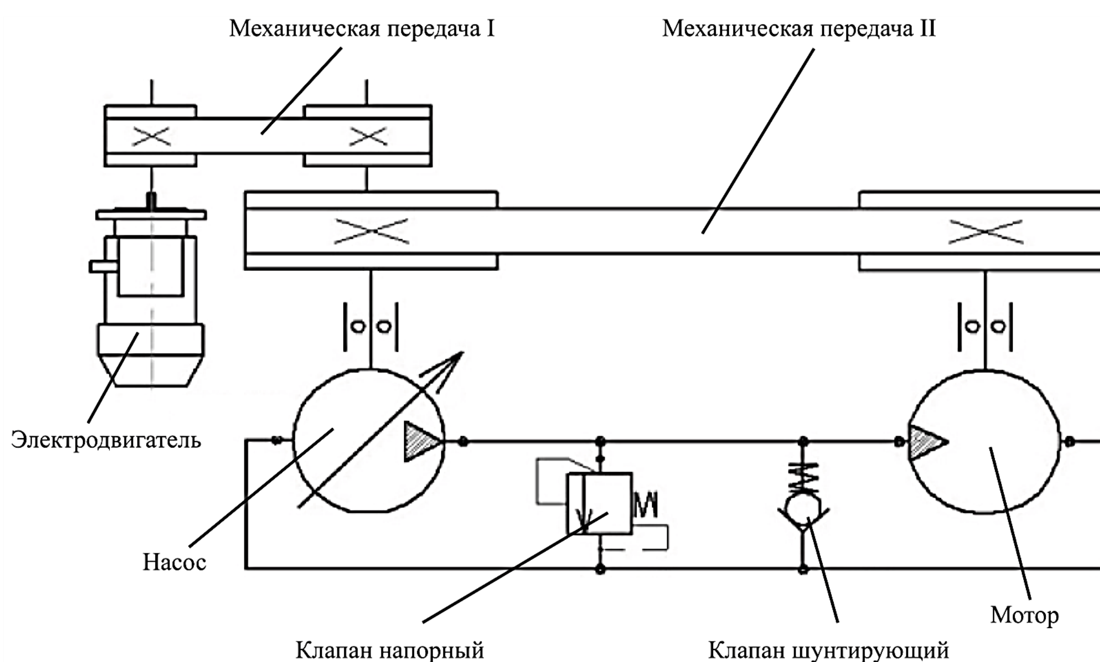


Рис. 1. Схема рекуперативной системы типа «насос – мотор – насос»

Однако указанный стенд не позволяет производить испытания гидравлических поршневых цилиндров. Целью настоящей работы является разработка структуры и принципиальной схемы стенда испытаний поршневых гидроцилиндров, который бы обеспечивал рекуперацию части энергии, затрачиваемой на испытания, а также его моделирование и предварительный расчёт эксплуатационных характеристик.

Материалы и методы. На основе известных ранее способов испытания разработан стенд для испытаний поршневых гидравлических цилиндров с рекуперацией энергии [16], структурная схема предлагаемого экспериментального стенда изображена на рис. 2.

Система стенда включает в себя четыре гидромеханические подсистемы и систему контроля и управления процессом испытания:

1) первичный источник энергии, включающий в себя электрический двигатель ЭД и гидравлический насос Н и предназначенный для компенсации энергии, теряемой системой в процессе испытания;

2) механизм испытания гидроцилиндров, включающий в себя испытуемые гидравлические цилиндры ГЦ1 и ГЦ2, механическую передачу МП и гидравлический распределитель ГР;

3) направляющая система, состоящая из обратных клапанов КО1, КО2, КО3 и КО4 и предназначенная для управления потоками жидкости при изменении направления движения рабочих органов гидравлических цилиндров;

4) система рекуперации энергии, включающая в себя гидромотор М, напорный гидроклапан КН и механическую передачу МП, предназначенную для создания нагрузки на испытуемых гидравлических цилиндрах и возврата части энергии с вала гидромотора М на вал гидронасоса Н и осуществления рекуперация энергии в процессе испытаний;

5) подсистема контроля и управления «Автоматическая система контроля и управления» (АСКУ), предназначенная для контроля основных технологических параметров процесса испытаний гидроцилиндров и управления этим процессом, включающая в себя датчики давления ДД1…ДД4, датчики оборотов ДО1 и ДО2, датчик поворота ДП и киловаттметр КМ, предназначенные для измерения давления в характерных точках системы, скорости вращения валов гидронасоса Н и гидромотора М, угла поворота коромысла КС, мощности, потребляемой электромотором ЭД, и дальнейшей обработки информации, для чего АСКУ имеет электронную систему обработки и вывода на экран и печать полученной информации о ходе испытания.

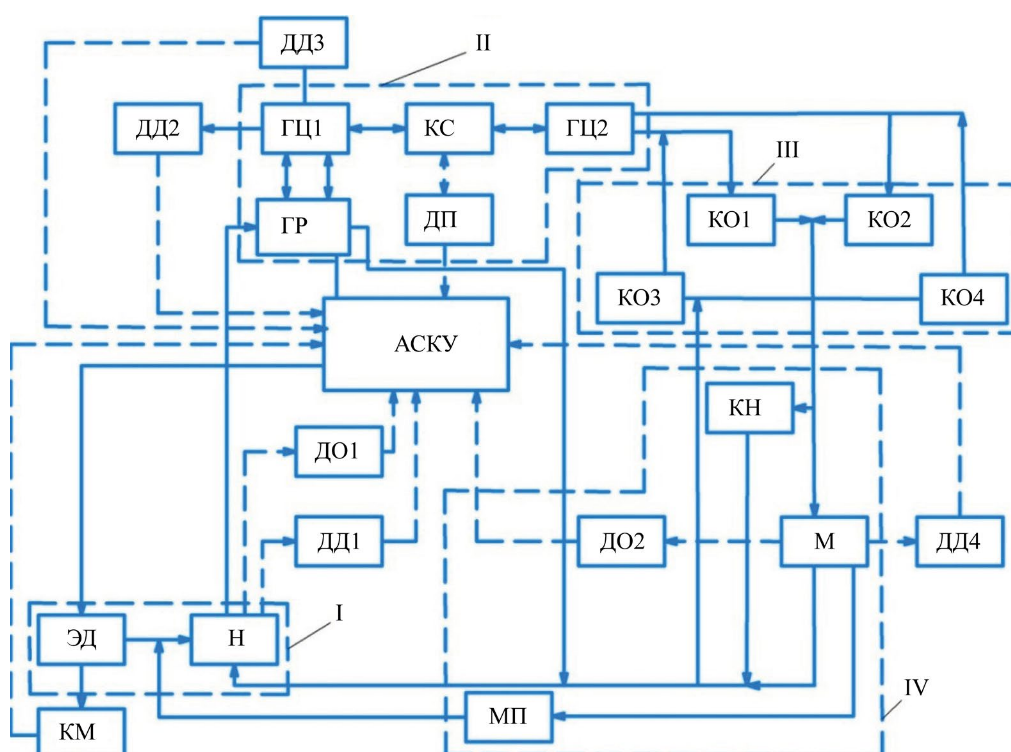


Рис. 2. Структурная схема экспериментального стенда испытания поршневых гидравлических цилиндров с рекуперацией энергии

На структурной схеме, представленной на рис. 2, сплошными линиями показаны гидравлические и механические связи элементов системы, а штриховыми линиями — связи элементов АСКУ.

Модель преобразования энергии на экспериментальном стенде, согласно предложенной структурной схеме, будет осуществляться следующим образом.

Энергия, которая возникает на выходе первичного источника энергии I в результате его функционирования $N_{выхI}$, передаётся с некоторыми потерями на вход механизма испытания гидроцилиндров II $N_{вхII}$:

$$N_{вхII} = N_{выхI} \cdot \eta_{I-II}, \qquad (1)$$

где η_{I-II} — коэффициент полезного действия, учитывающий соответствующие потери энергии.

Мощность на выходе механизма испытания гидроцилиндров II после её двойного преобразования внутри второй подсистемы, с учётом соответствующих потерь, можно определить по уравнению:

$$N_{выхII} = N_{вхII} \cdot \eta_{II}, \qquad (2)$$

где $N_{выхII}$ — мощность на выходе механизма испытания гидроцилиндров II; η_{II} — коэффициент полезного действия механизма испытания гидроцилиндров II, учитывающий потери энергии, возникающие во второй подсистеме в результате её двойного преобразования — из гидравлической в механическую и наоборот. Они складываются из потерь гидравлической энергии во внутренних гидравлических линиях системы и потерь механической энергии при перемещении поршней гидравлических цилиндров ГЦ1, ГЦ2 и в механической передаче МП энергии от ведущего гидроцилиндра ГЦ1 к ведомому ГЦ2.

Мощность, поступающая на вход третьей подсистемы направляющей системы *III,* определится с учётом потерь гидравлической энергии между механизмом испытания гидроцилиндров *II* и подсистемой *III*, которая теряется на преодоление гидравлического сопротивления соответствующих гидравлических линий:

$$N_{\text{вх}III} = N_{\text{вых}II} \cdot \eta_{II-III}, \quad (3)$$

где $N_{\text{вх}III}$ — мощность гидравлического потока на входе направляющей системы *III*; $\eta_{II–III}$ — коэффициент полезного действия гидравлической передачи (гидравлической системы) между второй и третьей подсистемами, учитывающий потери энергии в соответствующих гидравлических линиях.

Мощность потока жидкости на выходе третьей подсистемы определится из уравнения:

$$N_{\text{вых}III} = N_{\text{вх}III} \cdot \eta_{III}, \quad (4)$$

где $N_{\text{вых}III}$ — мощность потока жидкости на выходе подсистемы *III*; η_{III} — коэффициент полезного действия третьей подсистемы, учитывающий потери энергии в процессе функционирования направляющей системы.

Мощность потока жидкости на входе системы рекуперации энергии определится из уравнения:

$$N_{\text{вх}IV} = N_{\text{вых}III} \cdot \eta_{III-IV}, \quad (5)$$

где $N_{\text{вх}IV}$ — мощность потока жидкости на выходе четвёртой подсистемы; $\eta_{III–IV}$ — коэффициент полезного действия, учитывающий соответствующие потери энергии.

Мощность на выходе системы рекуперации энергии будет складываться из двух составляющих — мощности гидравлического потока, передаваемого от слива системы рекуперации энергии на вход гидронасоса Н, и механической энергии, передаваемой с вала гидромотора на вал гидронасоса посредством механической передачи МП.

При этом суммарную мощность, отдаваемую системой рекуперации энергии $N_{\text{вых}IV}$ первичному источнику энергии, можно определить по формуле:

$$N_{\text{вых}IV} = N_{\text{вх}IV} \cdot \eta_{IV}, \quad (6)$$

где η_{IV} — полный коэффициент полезного действия системы рекуперации энергии *IV*.

Суммарная мощность, поступающая на вход первичного источника энергии $N_{\text{вх}I}$ от системы рекуперации энергии, с учётом полного коэффициента полезного действия, учитывающего как механические, так и гидравлические потери энергии при передаче её с выхода системы рекуперации энергии на вход первичного источника энергии $\eta_{IV–I}$, может быть определена по формуле:

$$N_{\text{вх}I} = N_{\text{вых}IV} \cdot \eta_{IV-I}. \quad (7)$$

Мощность $N_{\text{вх}I}$, поступившая на вход первичного источника энергии с выхода системы рекуперации энергии, суммируется с мощностью $N_{\text{ЭДвых}}$, поступившей с выхода электрического двигателя ЭД, и преобразуется насосом Н в мощность $N_{\text{вых}I}$ потока рабочей жидкости на выходе первичного источника энергии, которую можно определить по формуле:

$$N_{\text{вых}I} = \left(N_{\text{ЭДвых}} \cdot \eta_{\text{ЭД–Н}} + N_{\text{вх}I}\right) \cdot \eta_{\text{Н}}, \quad (8)$$

где $\eta_{\text{ЭД–Н}}$ — коэффициент полезного действия механической передачи между электродвигателем ЭД и насосом Н; $\eta_{\text{Н}}$ — полный КПД насоса.

$$N_{\text{ЭДвых}} = N_{\text{ЭДвх}} \cdot \eta_{\text{ЭД}}, \quad (9)$$

где $N_{\text{ЭДвх}}$ — мощность на входе электродвигателя ЭД (мощность, потребляемая электродвигателем из питающей электрической сети); $\eta_{\text{ЭД}}$ — коэффициент полезного действия электродвигателя.

Совместное решение уравнений (1)–(9) позволяет получить уравнение:

$$N_{\text{ЭДвых}} \cdot \eta_{\text{ЭД–Н}} \cdot \eta_{\text{ЭД}} \cdot \eta_{\text{Н}} = N_{\text{вх}II}\left(\frac{1}{\eta_{I\text{-}II}} - \eta_{II} \cdot \eta_{II-III} \cdot \eta_{III} \cdot \eta_{III-IV} \cdot \eta_{IV} \cdot \eta_{IV-I}\right), \quad (10)$$

или

$$\frac{N_{\text{вх}II}}{N_{\text{ЭДвых}}} = \frac{\eta_{\text{ЭД–Н}} \cdot \eta_{\text{ЭД}} \cdot \eta_{\text{Н}} \cdot \eta_{I\text{-}II}}{1 - \eta_{II} \cdot \eta_{II-III} \cdot \eta_{III} \cdot \eta_{III-IV} \cdot \eta_{IV} \cdot \eta_{IV-I}}. \quad (11)$$

В правой части уравнения (11) видим отношение мощности, подведённой к испытуемым гидромашинам (ГЦ1, ГЦ2), к мощности, потребляемой электродвигателем источника питания системы испытания *I*. Это есть не что иное, как коэффициент эффективности системы испытания $k_{\text{эфф}}$. Таким образом, коэффициент эффективности рассматриваемой рекуперативной системы в общем случае определяется формулой:

$$k_{\text{эфф}} = \frac{\eta_{\text{ЭД–Н}} \cdot \eta_{\text{ЭД}} \cdot \eta_{\text{Н}} \cdot \eta_{I\text{-}II}}{1 - \eta_{II} \cdot \eta_{II-III} \cdot \eta_{III} \cdot \eta_{III-IV} \cdot \eta_{IV} \cdot \eta_{IV-I}}. \quad (12)$$

Из уравнения (12) видно, что в общем случае коэффициент эффективности $k_{эфф}$ предлагаемой системы испытаний поршневых гидроцилиндров определяется коэффициентами полезного действия составляющих систему испытаний подсистем и элементов. В числителе уравнения (12) произведение коэффициентов полезного действия всех элементов передачи энергии — от первичного источника электрической энергии до механизма испытания гидроцилиндров, а в знаменателе — разность единицы и произведения коэффициентов полезного действия остальных элементов системы. Таким образом, для повышения коэффициента эффективности системы испытаний нужно прежде всего повышать коэффициенты полезного действия всех составляющих систему элементов.

Теоретически, если коэффициенты полезного действия всех элементов, составляющих систему испытания гидроцилиндров, равны 1, то коэффициент эффективности системы испытания становится равным бесконечности.

В соответствии с рассмотренной структурной схемой, представленной на рис. 2, разработана принципиальная схема экспериментального стенда, которая приведена на рис. 3. В ней в качестве гидравлической рекуперационной системы применена гидравлическая передача ГСТ-90, включающая в себя регулируемый гидравлический насос Н1 и нерегулируемый гидромотор ГМ, кинематически связанные механической передачей МП2.

Первичный источник энергии *I* на экспериментальном стенде имеет гидравлическую связь с механизмом испытания гидроцилиндров *II* посредством гидравлической линии *l*1, которая, в свою очередь, гидролиниями *l*13 и *l*14 связана с направляющей системой *III,* а далее гидравлической линией *l*16 с системой рекуперации энергии *IV* и гидролиниями *l*6, *l*9 и *l*10 с первичным источником энергии *I*.

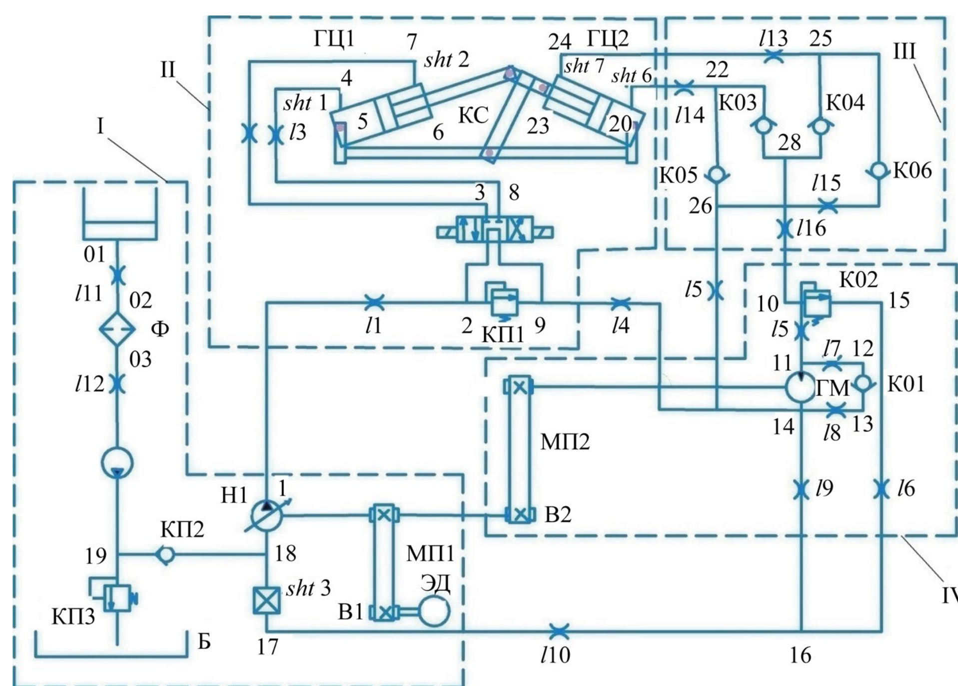


Рис. 3. Гидрокинематическая схема стенда испытания поршневых гидроцилиндров

Таким образом, гидравлическая система стенда, как и его энергетическая система, представляет собой замкнутый контур.

Наиболее эффективный метод предварительного исследования свойств разрабатываемых технических систем является его моделирование с последующим исследованием [17], а потому для подтверждения правильности рассмотренного ранее метода моделирования стенда испытания поршневых гидравлических цилиндров разработана его математическая модель с использованием теории объёмной жёсткости [18]. Для этого гидравлическая система стенда разбита на участки характерными точками (всего 32 точки, включая точки 01, 02, 03 и 04 системы подпитки).

В соответствии с теорией объёмной жёсткости гидравлических систем производная по времени давления с учётом приведенного коэффициента объёмной жёсткости рассматриваемого участка $C_{прi}$ может быть определена в зависимости от величин входящих $Q_{вхi}$ и выходящих расходов жидкости $Q_{выхi}$ по формуле:

$$\frac{dp_i}{dt} = C_{прi}\left(\sum Q_{вхi} - \sum Q_{выхi}\right). \qquad (13)$$

Расходы рабочей жидкости для подстановки в уравнение (13) определяются в соответствии с реальными условиями функционирования системы по известным зависимостям [19].

Подачи гидравлических насосов Н1 и Н2 и расход гидравлического мотора ГМ определяются с учётом их объёмных коэффициентов полезного действия.

Так как валы гидронасоса В2 и гидромотора В3 связаны механической передачей, то выполняется зависимость:

$$\omega_{B3} = \omega_{B2} i_{3_2}, \quad (14)$$

где i_{3_2} — передаточное число механической передачи МП2 вращения с вала гидромотора В3 на вал гидронасоса В2.

Скорость вращения вала гидронасоса задаётся угловой скоростью вала электродвигателя В1 ω_{B1} и определяется из соотношения:

$$\omega_{B1} = \omega_{B2} i_{1_2}, \quad (15)$$

где i_{1_2} — передаточное число механической передачи МП1 вращения с вала электродвигателя В1 на вал гидронасоса В2.

Расходы через клапаны (напорные КП1…КП3 и обратные КО1…КО6) определяются по их расходным характеристикам из соотношения:

$$\begin{aligned} &\text{если } p_{\text{кл}} < p_{\text{кл.откл}}, \text{ то } Q_{\text{кл}} = 0; \\ &\text{если } p_{\text{кл}} \geq p_{\text{кл.откл}}, \text{ то } Q_{\text{кл}} = Q_{\text{кл}.nom} \cdot \frac{p_{\text{кл}} - p_{\text{кл.откр}}}{\Delta p_{\text{кл}.nom}}, \end{aligned} \quad (16)$$

где $p_{\text{кл}}$ — давление на входе клапана; $p_{\text{кл.откр}}$ — давление начала открытия клапана; $\Delta p_{\text{кл}.nom}$ — разность между давлением полного открытия клапана при номинальном расходе и давлением начала открытия клапана; $Q_{\text{кл}}$ — действительный расход рабочей жидкости через клапан; $Q_{\text{кл}.nom}$ — номинальный расход клапана.

На рис. 4 представлена кинематическая схема механизма испытания гидравлических цилиндров. При моделировании её работы следует иметь в виду, что скорость движения поршня гидроцилиндра ГЦ1 определяется величиной расхода рабочей жидкости, подаваемой в его поршневую полость:

$$v_{\text{ц}1} = \frac{Q_{4_5}}{S_{\Pi}}. \quad (17)$$

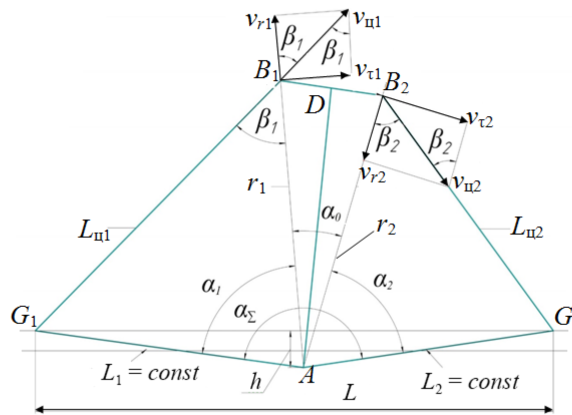


Рис. 4. Кинематическая схема механизма испытания гидроцилиндров

Перемещение гидроцилиндра $L_{\text{ц}1}$ передаётся механической передаче МП, которая при этом будет совершать вращательное движение вокруг точки A.

Угловая скорость вращения механической передачи МП будет определяться тангенциальной составляющей $v_{\tau 1}$ скорости перемещения поршня гидроцилиндра ГЦ1 и зависит от угла β_1 между направлением перемещения его и радиусом r_1, соединяющим точку вращения механической передачи МП и точку B_1 соединения с ней штока гидроцилиндра ГЦ1:

$$\omega_{AD} = \frac{v_{\tau 1}}{r_1},$$

или

$$\omega_{AD} = \frac{v_{\text{ц}1} \cdot sin\beta_1}{r_1}. \quad (18)$$

Вращаясь вокруг точки A, механическая передача МП будет передавать движение поршню ведомого гидроцилиндра ГЦ2, скорость которого $v_{\text{ц}2}$ также будет зависеть от угла β_2 между направлением его перемещения и радиусом r_2, соединяющим точку вращения механической передачи МП и точку B_2 соединения с ней штока гидроцилиндра ГЦ2:

$$v_{\text{ц}2} = \frac{r_2 \omega_{AD}}{sin\beta_2}. \quad (19)$$

Решив совместно уравнения (18) и (19), получим формулу, определяющую связь скоростей движения поршней ведущего ГЦ1 и ведомого ГЦ2 гидроцилиндров:

$$v_{ц2} = v_{ц1}\frac{r_2}{r_1}\frac{sin\beta_1}{sin\beta_2}. \tag{20}$$

Из анализа треугольников (по закону косинусов) AG_1B_1 и AG_2B_2 определяются углы β_1 и β_2:

$$cos\beta_1 = \frac{L_{c1}^2 + r_1^2 - L_1^2}{2L_{ц1}r_1},$$

$$cos\beta_2 = \frac{L_{c2}^2 + r_2^2 - L_2^2}{2L_{ц2}r_2},$$

где $L_{ц1}$ и $L_{ц2}$ — расстояния между осями соединения корпусов соответствующих гидроцилиндров к раме стенда и их штоков с механической передачей МП; L_1 и L_2 — расстояния от оси вращения механической передачи МП и точками G_1 и G_2 соединения с рамой стенда корпусов гидравлических цилиндров ГЦ1 и ГЦ2 соответственно.

При обратном ходе поршня ведомого гидроцилиндра ГЦ1 рабочая жидкость подаётся в его штоковую полость и тогда остальные расчётные формулы останутся без изменения.

$$v_{ц1} = \frac{Q_{7_6}}{S_{п.шт}}. \tag{21}$$

При динамических расчётах движение поршня ведущего цилиндра ГЦ1 описывается уравнением движения:

$$\frac{dv_{ц1}}{dt} = \frac{1}{M_{пр1}}\left(S_п \cdot p_5 - S_{п.шт} \cdot p_6 - v_1 \cdot k_{тр1} - F_1\right); \tag{22}$$

$$\frac{dx_{ц1}}{dt} = v_1, \tag{23}$$

где $v_{ц1}$ и $x_{ц1}$ — скорость и перемещение поршня ГЦ1; $M_{пр1}$ — приведенная масса; $S_п$ и $S_{п.шт}$ — рабочие площади поршней гидроцилиндров; p_5 и p_6 — давление в соответствующих полостях ГЦ1; $k_{тр1}$ — коэффициент трения при движении рабочего органа первого гидроцилиндра ГЦ1, учитывающий и трение в передаточном механизме КС; F_1 — сила воздействия на рабочий орган ведущего гидроцилиндра со стороны ГЦ2.

Сила F_1 определяется по формуле:

$$F_1 = \left(S_п \cdot p_{20} - S_{п.шт} \cdot p_{23} + v_{ц2} \cdot k_{тр2}\right) \cdot \frac{sin\beta_2}{sin\beta_1}; \tag{24}$$

где p_{20} и p_{23} — давление в поршневой и штоковой полостях ведомого гидроцилиндра ГЦ2, соответственно $v_{ц2}$ и $k_{тр2}$ — скорость перемещения рабочего органа ведомого гидроцилиндра ГЦ2 и коэффициент трения при его движении.

Результаты исследования. На рис. 5–9 приведены результаты предварительного расчёта предложенной математической модели испытательного стенда. Расчёты проводились с использованием специальной программы, разработанной в среде SimInTech [20]. Расчёты позволяют уже на стадии проектирования стенда определить его функциональные параметры и принять конструктивные меры по их улучшению.

Проанализировав графики параметров движения поршней испытуемых гидравлических цилиндров, представленных на рис. 5, можно сделать вывод, что цикл испытания поршневых гидроцилиндров ГЦ63.500.16.000 на предлагаемом стенде будет длиться около четырех секунд. Скорость движения поршня при выдвижении штока составит 0,24 м/с, а при его втягивании — 0,32 м/с.

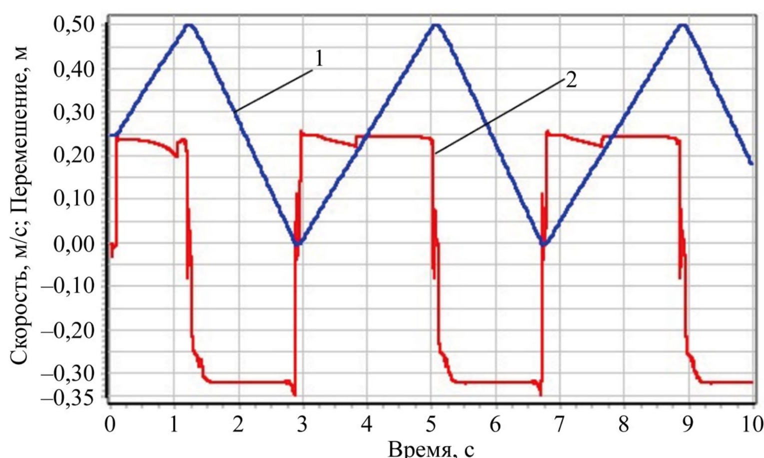


Рис. 5. Изменение параметров движения поршня ведущего гидроцилиндра в процессе испытания:
1 — перемещение; 2 — скорость

На графиках, представленных на рис. 5, видно, что гидравлические цилиндры в процессе испытания подвергаются воздействию давления рабочей жидкости от 120 до 130 атмосфер. Особый интерес вызывает тот факт, что в процессе испытания в момент реверса направления движения поршня давление во всех рассматриваемых точках становится одинаковы — около 70 атмосфер.

На рис. 6 приведены данные о давлении в узловых точках гидравлической системы стенда в процессе испытания.

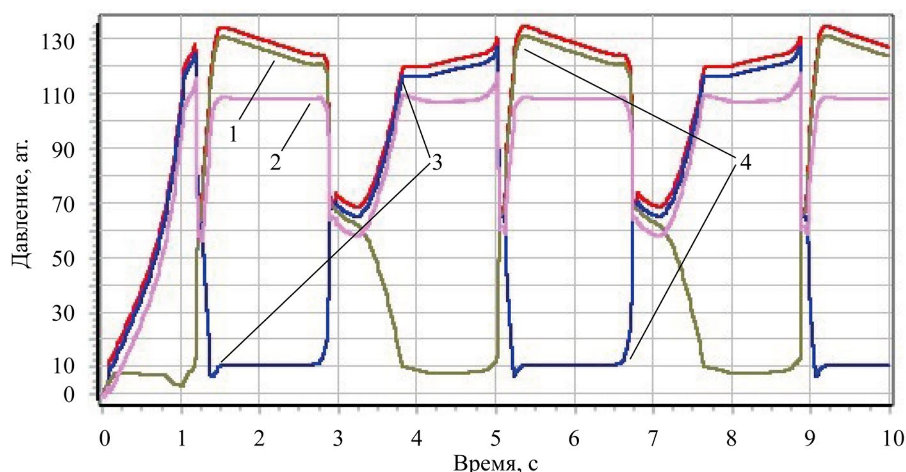


Рис. 6. Изменение давления в характерных точках гидросистемы стенда в процессе испытания гидроцилиндров:
1 — выход гидронасоса; 2 — вход гидромотора; 3 — поршневая полость ГЦ1; 4 — штоковая полость ГЦ1

Графики изменения давления в гидравлических линиях низкого давления, которые приведены на рис. 7, позволяют оценить величину и характер изменения давления на входе в питающий гидронасос стенда. На рисунке показано, что в момент реверса движения поршней испытуемых гидроцилиндров давление во всасывающем патрубке основного гидронасоса стенда резко возрастает до 70 атмосфер. Особо выделяется тот факт, что при смене направления движения поршня ведущего гидроцилиндра с выдвижения на втягивание давление на выходе насоса подпитки становится меньше давления настройки его напорного клапана. Чтобы объяснить этот эффект, следует вспомнить, что гидравлическая система стенда является по сути закрытой системой, то есть во всасывающий патрубок основного насоса стенда поступает рабочая жидкость из слива системы рекуперации. В некоторый момент функционирования стенда этой жидкости не хватает, основной насос получает дополнительный расход жидкости от насоса подпитки. Этот факт очень важно помнить при проектировании испытательного стенда.

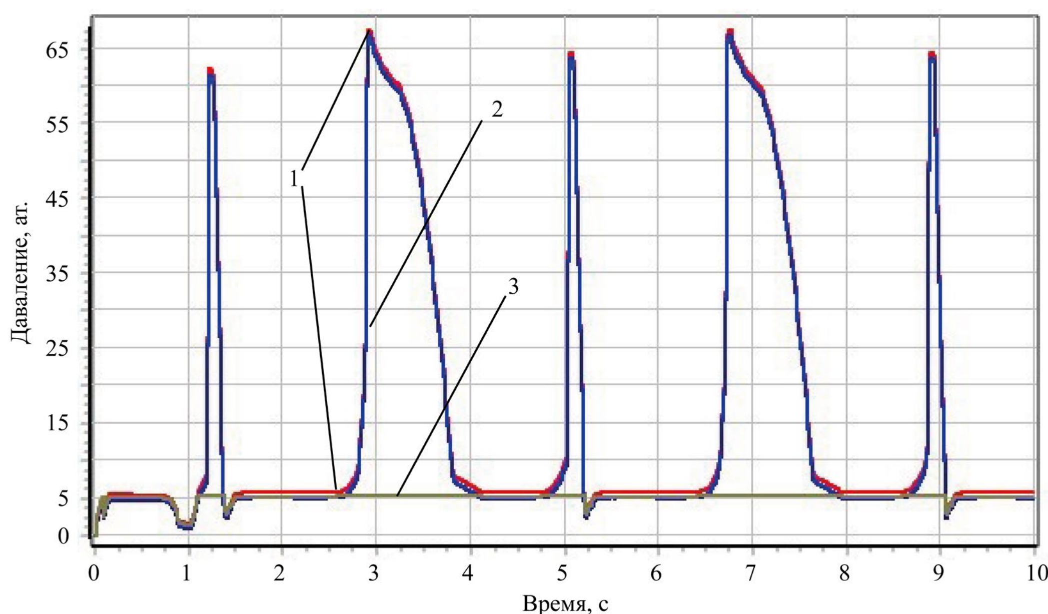


Рис. 7. Изменение давления в характерных точках гидросистемы низкого давления в процессе испытания гидроцилиндров:
1 — выход гидросистемы механизма испытания гидроцилиндров;
2 — вход основного гидронасоса; 3 — выход гидронасоса подпитки

На графиках изменения мощности на гидравлических машинах испытательного стенда в процессе испытания, представленных на рис. 8, видно, что наибольшая мощность в процессе испытания гидроцилиндров имеет место на выходе гидронасоса, а самая маленькая — на входе основного источника энергии стенда — электрического мотора. В этом и заключена основная цель, которую авторы добивались, создавая стенд с рекуперативной системой: система рекуперации возвращает часть энергии, затраченной на испытание гидроцилиндров, обратно гидравлическому насосу, что снижает общее потребление энергии первичным источником, а это ведёт к повышению энергетической эффективности процесса испытаний. Следует отметить также, что при реверсе направления движения поршней испытуемых гидроцилиндров мощность на некоторых элементах стенда принимает отрицательное значение. Очевидно, что это эффект выделения энергии, накопленной в системе при её упругой деформации, объёмного сжатия в гидросистеме.

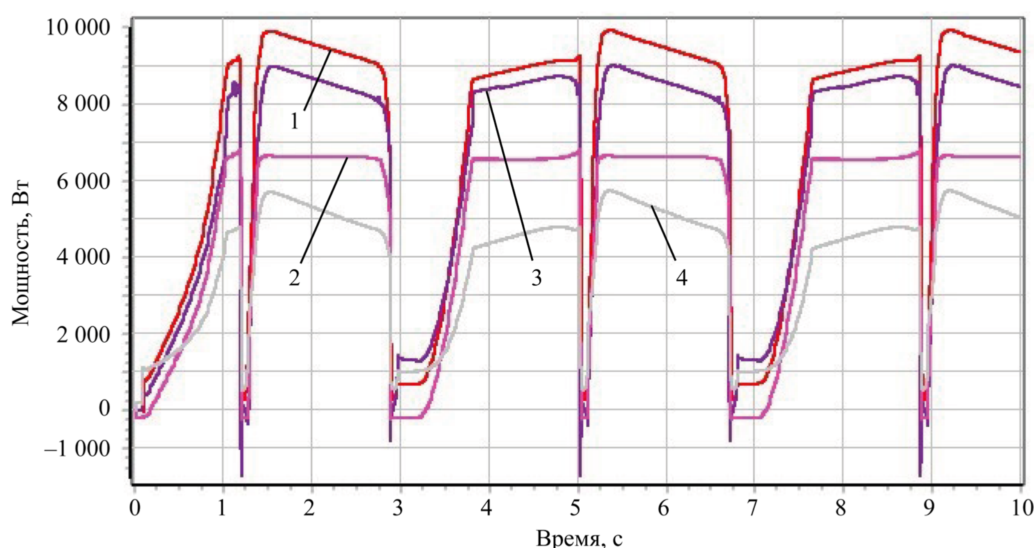


Рис. 8. Изменение мощности на гидравлических машинах стенда в процессе испытания гидроцилиндров:
1 — выход гидронасоса; 2 — вал гидромотора; 3 — в системе испытания гидроцилиндров; 4 — вход электродвигателя

На графиках, приведенных на рис. 9, видно, что мгновенный коэффициент эффективности при реверсе направления движения поршней испытуемых гидроцилиндров принимает нулевое значение. Это объясняется тем, что в этот момент поршень гидроцилиндра останавливается, следовательно, становится равной нулю и мощность на испытываемых гидроцилиндрах.

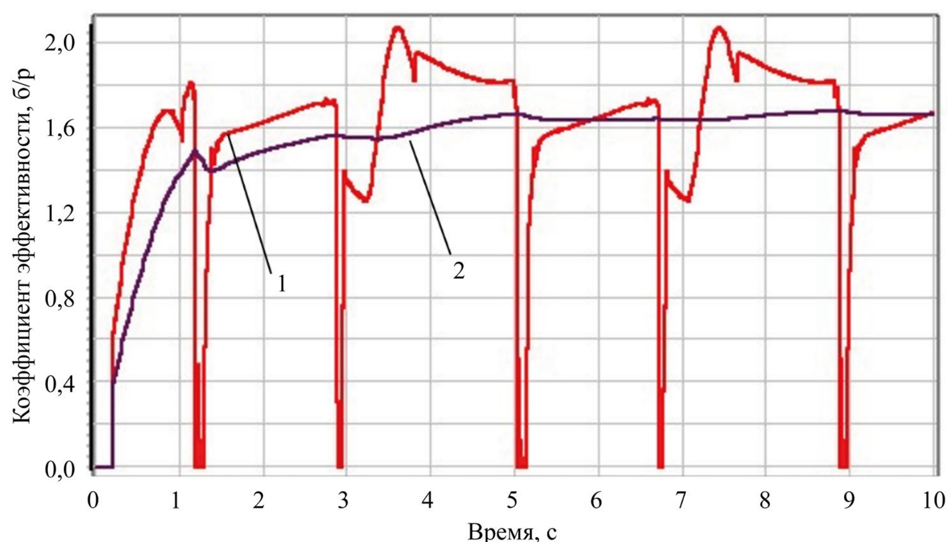


Рис. 9. Коэффициенты эффективности испытания: 1 — мгновенное значение; 2 — среднее значение

Видно также, что величина среднего коэффициента эффективности испытания приближается к значению 1,7. Это указывает на то, что мощность испытания гидроцилиндров на 70 % больше мощности, затраченной в процессе данного испытания.

Обсуждение и заключение. Представленные в настоящей статье результаты проведенной авторами работы показывают, что предложенная схема стенда позволяет проводить испытания поршневых гидравлических цилиндров с коэффициентом эффективности испытаний 1,7. Имея в виду, что испытания, проводимые с использование классических методов нагружения, имеют коэффициент эффективности не более 0,8–0,9, можно сделать вывод, что предложенная схема рекуперации энергии эффективнее классических методов нагружения более, чем в 2 раза. То есть при испытаниях одних и тех же гидравлических цилиндров расходуется энергии в два с лишним раза меньше, чем при испытаниях с применением специальных средств нагружения (механических, гидравлических и др.) без рекуперации энергии.

Предельная (наибольшая) величина коэффициента эффективности проведения испытаний поршневых гидроцилиндров с использованием предлагаемого стенда может быть определена по уравнению (12). Предложенная математическая модель стенда и программа, разработанная для ее исследования, позволяют произвести предварительное изучение влияния различных конструктивных и функциональных параметров стенда на коэффициент эффективности испытаний, в результате которого могут быть получены рациональные величины конструктивных параметров стенда.

Список литературы / References

1. Суслов А.Г., Фёдоров В.П., Горленко О.А., Ильицкий В.Б., Тотай А.В., Хандожко А.В. и др. *Фундаментальные основы технологического обеспечения и повышения надёжности изделий машиностроения.* Москва: Инновационное машиностроение; 2022. 552 с.

Suslov AG, Fedorov VP, Gorlenko OA, Il'itsky VB, Totai AV, Khandozhko AV, et al. *Fundamental Principles of Technological Support and Increasing the Reliability of Mechanical Engineering Products*. Moscow: Innovatsionnoe mashinostroenie; 2022. 552 p. (In Russ.)

2. Теплякова С.В. Обоснование концепции создания практически безотказных машин. *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки.* 2021;210(2):41–45. https://doi.org/10.17213/1560-3644-2021-2-41-45

Teplyakova SV. Justification of the Concept of Creating Practically Trouble-Free Machines. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Technical Sciences.* 2021;210(2):41–45. https://doi.org/10.17213/1560-3644-2021-2-41-45

3. Kuznetsova VN, Savinkin VV. Development of Hybrid Drive's Construction of a Traversing Platform of an Earthmoving Machine for Implementing Construction Works. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2015;41(1):17–23. URL: https://vestnik.sibadi.org/jour/article/view/95 (accessed: 20.08 2024).

4. Дерюшев В.В., Теплякова С.В., Зайцева М.М. Оценка безопасности производственных объектов по предельным значениям безотказности машин. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2023;7(2):58–69. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-2-58-69

Deryushev VV, Teplyakova SV, Zaitseva MM. Production Facilities Safety Assessment according to the Maximum Values of Machines Reliability. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2023;7(2):58–69. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-2-58-69

5. Antipas IR. Modeling the Dynamic Loads Affecting a Bridge Crane during Start-Up. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don).* 2024;24(2):190–197. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-2-190-197

6. Никонов В.О., Посметьев В.И., Козлов Е.В., Бородкин В.О. Анализ конструктивных особенностей гидрофицированных технологических машин с рекуперацией потенциальной энергии рабочего органа с грузом. *Воронежский научно-технический вестник.* 2019;27(1):4–19.

Nikonov VO, Posmetev VI, Kozlov EV, Borodkin VO. Analysis of Constructive Peculiarities of Hydroficated Technological Machines with Recovery of the Potential Energy of the Working Body with Cargo. *Voronezh Scientific-Technical Bulletin*. 2019;27(1):4–19.

7. Чмиль В.П. Рекуперативная трансмиссия как средство улучшения эксплуатационных свойств автомобилей. *Механизация строительства.* 2017;78(8):55–59.

Chmil VP. Reconcilitive Transmission as Means of Improving the Operational Properties of Cars. *Mechanization of Construction.* 2017;78(8):55–59.

8. Чмиль В.П. Рекуперация энергии в гидромеханизме поворота платформы экскаватора. *Механизация строительства.* 2017;78(2):5–8.

Chmil VP. Energy Recovery in Hydraulic Mechanism of Turning Excavator Platform. *Mechanization of Construction.* 2017;78(2):5–8.

9. Lianpeng Xia, Long Quan, Lei Ge, Yunxiao Hao. Energy Efficiency Analysis of Integrated Drive and Energy Recuperation System for Hydraulic Excavator Boom. *Energy Conversion and Management.* 2018;156:680–687. http://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.11.074

10. Popikov PI, Derepasko IV, Khomenko KG, Rudoy DV, Olshevskaya AV, Rybak AT, et al. Analysis of Studies of Work Processes of Energy-Saving Hydraulic Drives and Devices of Highly Loaded Technological Machines and Equipment. *E3S Web of Conferences*. 2023;462:01039. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202346201039

11. Устьянцев М.В. *Повышение эффективности привода стенда испытаний гидромашин вращательного действия*. Автореф. дис. канд. техн. наук. Ростов-на-Дону; 2012. 18 с.

Ustyantsev MV. *Improving the Efficiency of the Drive of the Test Stand for Rotary Hydraulic Machines*. Cand.Sci. (Eng.), diss., author's abstract. Rostov-on-Don; 2012. 18 p. (In Russ.)

12. Фоминых А.М. Применение энергоэффективного метода диагностики гидравлических приводов. *Евразийский союз ученых.* 2014;3(6):46–48.

Fominykh AM. Application of Energy-Efficient Diagnostic Method for Hydraulic Drives. *Eurasian Union of Scientists.* 2014;3(6):46–48. (In Russ.)

13. Рыбак А.Т., Цыбрий И.К., Пелипенко А.Ю. *Стенд для испытаний гидравлических моторов и насосов с рекуперацией энергии.* Патент РФ, № 204153. 2021. 7 с.

Rybak AT, Tsybriy IK, Pelipenko AYu. *Test Bench for Hydraulic Motors and Pumps with Energy Recovery*. RF Patent, no. 204153. 2021. 7 p. (In Russ.)

14. Rybak A, Meskhi B, Rudoy D, Olshevskaya A, Serdyukova Yu, Teplyakova S, et al. Improving the Efficiency of the Drive of the Test Bench of Rotary Hydraulic Machines. *Actuators.* 2024;13(2):63. https://doi.org/10.3390/act13020063

15. Pelipenko A, Rybak A, Vyborova N, Zubtsov V, Lugantsev D. Energy Saving in Hydraulic Testing Systems. In book: Guda A. (ed) *Networked Control Systems for Connected and Automated Vehicles*. Cham: Springer; 2022. P. 1889–1896. http://doi.org/10.1007/978-3-031-11051-1_194

16. Рыбак А.Т., Зенин А.Р., Пелипенко А.Ю. *Стенд для испытаний поршневых гидравлических цилиндров с рекуперацией энергии.* Патент РФ, № 2796721. 2022. 9 с.

Rybak AT, Zenin AR, Pelipenko AYu. *Test Stand for Piston Hydraulic Cylinders with Energy Recovery.* RF Patent, no. 2796721. 2022. 9 p. (In Russ.)

17. Юдин Р.В., Попиков П.И., Усков В.И., Платонов А.А., Попиков В.П., Канищев Д.А. Математическая модель рабочих процессов бесчокерного трелевочного захвата с энергосберегающим гидроприводом. *Resources and Technology.* 2022;19(1):72–86. http://doi.org/10.15393/j2.art.2022.6023

Yudin RV, Popikov PI, Uskov VI, Platonov AA, Popikov VP, Kanishchev DA. Mathematical Model of Working Processes of a Chokerless Hauling Grip with an Energy-Saving Hydraulic Drive. *Resources and Technology.* 2022;19(1):72–86. http://doi.org/10.15393/j2.art.2022.6023

18. Рыбак А.Т., Богуславский И.В. Совершенствование научно-методологических основ проектирования систем приводов технологических машин. *Вестник Донского государственного технического университета.* 2010;10(2):249–257. https://www.vestnik-donstu.ru/jour/article/view/971/966 (дата обращения: 20.08 2024).

Rybak AT, Boguslavskiy IV. Improvement of the Scientific-Methodological Design Principles of the Production Machines Drive Systems. *Vestnik of Don State Technical University*. 2010;10(2):249–257. https://www.vestnik-donstu.ru/jour/article/view/971/966

19. Богуславский И.В., Рыбак А.Т., Чернавский В.А. *Научно-методологические основы проектирования приводов технологических машин.* Монография. Ростов-на-Дону: Институт управления и инноваций авиационной промышленности; 2010. 276 с.

Boguslavskiy IV, Rybak AT, Chernavskiy VA. *Scientific-Methodological Foundations for Designing Drives for Technological Machines*. Monograph. Rostov-on-Don: Institute of Management and Innovation of the Aviation Industry; 2010. 276 p. (In Russ.)

20. Abalov AA, Nosachev SV, Zharov VP, Minko VA. Using the SimInTech Dynamic Modeling Environment to Build and Check the Operation of Automation Systems. *MATEC Web of Conferences.* 2018;226:04003. https://doi.org/10.1051/matecconf/201822604003

Об авторах:

Александр Романович Зенин, начальник управления капитального строительства и капитального ремонта, и. о. проректора по капитальному строительству и развитию имущественного комплекса, преподаватель кафедры безопасности жизнедеятельности и защиты окружающей среды Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), SPIN-код, ORCID, ScopusID, ResearcherID

Александр Тимофеевич Рыбак, доктор технических наук, профессор кафедры технологии оборудования и переработки продукции агропромышленного комплекса Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), SPIN-код, ORCID, ScopusID, ResearcherID, 2130373@mail.ru

Алексей Николаевич Бескопыльный, доктор технических наук, профессор, проректор по учебной работе и международной деятельности, профессор кафедры организации перевозок и дорожного движения Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), SPIN-код, ORCID, ScopusID, ResearcherID

Алексей Юрьевич Пелипенко, кандидат технических наук, доцент кафедры гидравлики, гидропневмоавтоматики и тепловых процессов Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), SPIN-код, ORCID, ScopusID, pelipenko16a@mail.ru

Юлия Александровна Сердюкова, аспирант кафедры безопасности жизнедеятельности и защиты окружающей среды Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), SPIN-код, ScopusID, serdyukova.ya@gs.donstu.ru

Заявленный вклад авторов:
А.Р. Зенин: разработка и проектирование методологии исследования, создание модели исследования.
А.Т. Рыбак: научное руководство, анализ результатов исследований.
А.Н. Бескопыльный: анализ результатов исследований, корректировка выводов, формирование выводов.
А.Ю. Пелипенко: формирование основной концепции, цели и задачи исследования.
Ю.А. Сердюкова: разработка программного обеспечения, проведение расчётов и участие в анализе их результатов.

Конфликт интересов: **авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Alexander R. Zenin, Head of the Department of Capital Construction and Capital Repairs, Acting Vice-Rector for Capital Construction and Development of the Property Complex, Teacher of the Department of Life Safety and Environmental Protection, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), SPIN-code, ORCID, ScopusID, ResearcherID

Alexander T. Rybak, Dr.Sci. (Eng.), Professor of the Department of Technologies and Equipment for Processing Agricultural Products, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), SPIN-code, ORCID, ScopusID, ResearcherID, 2130373@mail.ru

Alexey N. Beskopylny, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Vice-Rector for Academic and International Affairs, Professor of the Organization of Transportation and Road Traffic Department, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), SPIN-code, ORCID, ScopusID, ResearcherID

Alexey Yu. Pelipenko, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Hydraulics, Hydropneumoautomatics and Heat Management Department, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), SPIN-code, ORCID, ScopusID, pelipenko16a@mail.ru

Yuliya A. Serdyukova, Postgraduate student of Life Safety and Environment Protection Department, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), SPIN-code, ScopusID, serdyukova.ya@gs.donstu.ru

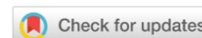
Claimed Contributorship:
AR Zenin: development and design of research methodology, creation of a research model.
AT Rybak: academic advising, analysis of the research results.
AN Beskopylny: analysis of the research results, correction of the conclusions, formulation of the conclusions.
AYu Pelipenko: basic concept formulation, research objectives and tasks.
YuA Serdyukova: development of software, calculations, participation in the analysis of their results.

Conflict of Interest Statement: **the authors claimed no conflict of interest.**

All authors have read and approved the final version of the manuscript.

Поступила в редакцию / Received 03.09.2024
Поступила после рецензирования / Reviewed 24.09.2024
Принята к публикации / Accepted 05.10.2024

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE

УДК 621.833.51
https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-4-360-368

Оригинальное эмпирическое исследование

Экспериментальное исследование кинематики двухрядной планетарной передачи эллиптическими зубчатыми колесами с двумя внешними зацеплениями



EDN: BSOKNM

А.А. Приходько✉, **Н.Н. Белина**, **А.В. Новицкий**, **М.М. Щетинин**
Кубанский государственный технологический университет, г. Краснодар, Российская Федерация
✉ sannic92@gmail.com

Аннотация

Введение. Механизмы с некруглыми зубчатыми колесами вызывают широкий интерес исследователей и изобретателей вследствие их компактности и реализации широкого спектра передаточных функций. Развитие данной области стимулируется развитием и удешевлением технологий механической обработки и аддитивного производства, а также применением прикладных пакетов математического моделирования для анализа и синтеза некруглых зубчатых колес. Некруглые зубчатые колеса традиционно служат для передачи вращательного движения между параллельными осями с переменным отношением угловых скоростей. Однако их применение в схемах планетарных передач позволяет реализовать различные виды движения выходного звена. Анализ работ по тематике исследования показывает, что передачи с подвижными осями вращения недостаточно исследованы с точки зрения кинематики и динамики. Большинство научных работ раскрывают теорию таких механизмов, не проводя верификации полученных результатов на практике. Целью настоящей работы является экспериментальная верификация кинематики планетарного механизма с двумя внешними зацеплениями, имеющего в своем составе эллиптические зубчатые колеса.

Материалы и методы. Кинематическая модель исследуемого механизма построена на базе плана скоростей его звеньев, который позволил получить выражения для нахождения аналога угловой скорости и функции положения выходного вала. Экспериментальное исследование кинематики выполнено на лабораторном стенде, содержащем макет планетарного механизма с набором сменных зубчатых колес, абсолютные энкодеры на входном и выходном валах механизма, контроллер и ПК для регистрации и обработки сигнала. Анализ полученных результатов проведен на ЭВМ с использованием методов статистического анализа.

Результаты исследования. В результате кинематического анализа построены функции положения для трех вариантов планетарного механизма, имеющих различные геометрические параметры зубчатых колес и позволяющих реализовать различные виды движения выходного вала: возвратно-вращательное движение, движение с остановками и одностороннее неравномерное вращение.

Обсуждение и заключение. Анализ результатов эксперимента показал адекватность построенной математической модели кинематики реальным механизмам. Доверительный интервал ошибок измерения при уровне достоверности 95 % составил для первого варианта механизма 0,16 ± 0,08, для второго варианта — 0,57 ± 0,22 и для третьего — 0,08 ± 0,26. Предложенный планетарный механизм с эллиптическими зубчатыми колесами для реализации различных видов движения может быть применен в приводах технологического оборудования многих отраслей промышленности: химической и пищевой (перемешивающие устройства), нефтеперерабатывающей (станки-качалки для добычи нефти), машиностроительной (компрессоры, насосы, станки-автоматы) и других. Проведенные кинематические исследования планетарного механизма и их экспериментальный анализ необходимы при дальнейшем динамическом и силовом исследованиях, а также при проектировании приводов на базе предложенной передачи.

Ключевые слова: планетарный механизм, эллиптические зубчатые колеса, кинематический анализ, функция положения, статистический анализ, неопределенность измерения, доверительный интервал

Благодарности. Авторы выражают благодарность редакции и рецензентам за внимательное отношение к статье и указанные замечания, которые позволили повысить ее качество.

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке Кубанского научного фонда в рамках научно-инновационного проекта № НИП–20.1/135 «Конструирование и исследование планетарной передачи эллиптическими зубчатыми колесами в составе привода поршневого компрессора».

Для цитирования. Приходько А.А., Белина Н.Н., Новицкий А.В., Щетинин М.М. Экспериментальное исследование кинематики двухрядной планетарной передачи эллиптическими зубчатыми колесами с двумя внешними зацеплениями. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don).* 2024;24(4):360–368. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-4-360-368

Original Empirical Research

Experimental Study of the Kinematics of a Double-Row Planetary Mechanism Using Two Elliptical External Gears

Alexander A. Prikhodko ✉, **Nataliya N. Belina**, **Andrey V. Novitsky**, **Maksim M. Shchetinin**
Kuban State Technological University, Krasnodar, Russian Federation
✉ sannic92@gmail.com

Abstract
Introduction. Mechanisms with non-circular gears are of wide interest to researchers and inventors due to their compactness and the implementation of a wide range of transfer functions. The development of this area is stimulated by the advancements and reduction in cost of mechanical processing and additive manufacturing technologies, as well as the use of applied mathematical modeling packages for the analysis and synthesis of non-circular gears. Traditionally, non-circular gears are used to transmit rotational motion between parallel axes with a variable ratio of angular velocities. However, their use in planetary gear schemes provides implementing various types of output link motion. The analysis of the papers on the research area shows that gears with movable rotation axes have not been sufficiently studied from the point of view of kinematics and dynamics. Most research papers reveal the theory of such mechanisms without verifying the results obtained in practice. This work is aimed at the experimental verification of the kinematics of a planetary mechanism with two external engagements, which contains elliptical gears.
Materials and Methods. The kinematic model of the mechanism under study is built on the basis of the velocity diagram of its links, which made it possible to obtain expressions for finding an analogue of the angular velocity and the position function of the output shaft. The experimental study of kinematics was performed on a laboratory stand containing a model of a planetary mechanism with a set of replaceable gear wheels, absolute encoders on the input and output shafts of the mechanism, a controller, and a PC for recording and processing the signal. The analysis of the obtained results was performed on a computer using statistical analysis methods.
Results. As a result of kinematic analysis, position functions were constructed for three alternative planetary mechanisms, which had different geometric parameters of the gears and made it possible to implement various types of motion of the output shaft: swinging motion, discontinuous motion, and unilateral uneven rotation.
Discussion and Conclusion. The analysis of the experimental results showed the adequacy of the constructed mathematical model of kinematics to real mechanisms. The confidence interval of measuring errors at a reliability level of 95% was 0.16±0.08° for the first version of the mechanism, 0.57±0.22° — for the second version, and 0.08±0.26° — for the third. The proposed planetary mechanism with elliptical gears for implementing various types of motion can be used in drives of process equipment in numerous industries: chemical and food (mixers), oil refining (pumping units for crude production), mechanical engineering (compressors, pumps, automated machines), and others. The conducted kinematic studies of the planetary mechanism and their experimental analysis are needed for further dynamic and force investigations, as well as for the design of drives based on the proposed transmission.

Keywords: planetary mechanism, elliptical gears, kinematic analysis, position function, statistical analysis, uncertainty of measurement, confidence interval

Acknowledgements. The authors would like to thank the Editorial board and the reviewers for their attentive attitude to the article and for the specified comments that improved its quality.

Funding Information. The work was done with the financial support from the Kuban Science Foundation within the framework of the research and innovative project no. NIP–20.1/135 “Design and Study of a Planetary Transmission with Elliptical Gears as Part of a Piston Compressor Drive”.

For citation. Prikhodko AA, Belina NA, Novitsky AV, Shchetinin MM. Experimental Study of the Kinematics of a Double-Row Planetary Mechanism Using Two Elliptical External Gears. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2024;24(4):360–368. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-4-360-368

Введение. Механизмы с некруглыми зубчатыми колесами известны давно, однако их экспериментальные исследования и практическое внедрение долгое время были затруднены из-за узкой специализации таких механизмов, сложности и высокой стоимости их изготовления. В настоящий момент наблюдается повышение интереса исследователей к данной тематике. При этом большинство научных работ в области проектирования передач некруглыми зубчатыми колесами основано на анализе геометрии [1] и кинематики [2] с целью получения требуемой передаточной функции для практического применения [3]. В [4] и [5] разработаны и изучены механизмы для синтеза функций угловой скорости; исследователями предложена робототехника с некруглыми колесами, например, прыгающий робот [6], робот-гексапод [7], механизм экзоскелета для реабилитации коленного сустава [8]; исследованы с точки зрения кинематики [9] и динамики [10] более эффективные посадочные машины для сельскохозяйственной промышленности; разработаны и спроектированы многие другие устройства.

Обзор источников показал, что наиболее распространены зубчатые колеса с эллиптической центроидой [11, 12]. Созданы машины [10] и устройства [4] с эллиптическими колесами, изучена геометрия [13], решены некоторые вопросы проектирования [14] и изготовления [15].

Эллиптические зубчатые колеса в основном применяются с целью передачи вращательного движения между параллельными неподвижными осями [16]. Однако такое использование некруглых колес позволяет получить лишь одностороннее неравномерное вращательное движение, что ограничивает сферу их применения. Планетарные передачи обладают более широкими возможностями для реализации сложных видов движения рабочих органов, а создание приводов на их основе позволит разработать и внедрить более эффективные и компактные машины различного технологического назначения.

По результатам анализа научной литературы в области передач некруглыми зубчатыми колесами в качестве объекта исследования предлагается планетарный механизм с эллиптическими колесами. Цель работы состоит в экспериментальном кинематическом анализе планетарной передачи и обосновывается необходимостью верификации теоретических положений для их корректного использования на следующих этапах проектирования — при динамическом, силовом анализе и расчетах на прочность.

Материалы и методы. Кинематическая модель механизма строится на основе плана скоростей его звеньев (рис. 1).

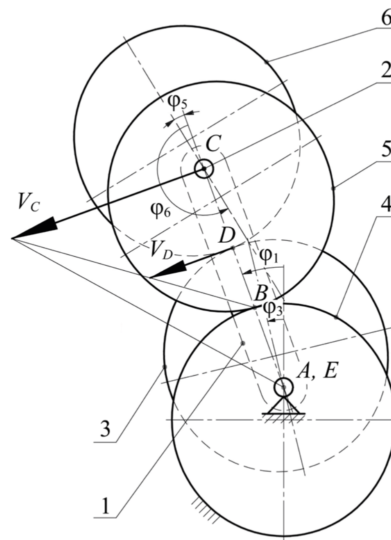


Рис. 1. План скоростей для рассматриваемого механизма:
1 — водило; 2 — вал сателлита; 3 — эллиптическое колесо на выходном валу;
4 — солнечное эллиптическое колесо; 5, 6 — эллиптические колеса сателлита

Аналог угловой скорости выходного вала определяется следующим образом [17]:

$$\varphi_3' = \frac{\omega_3}{\omega_1} = \frac{V_D \cdot AC}{V_C \cdot DE} = \frac{BD \cdot AC}{BC \cdot DE}. \quad (1)$$

Отрезки *BD, BC* и *DE* определяются через полярное уравнение эллипса [17]:

$$\rho(\varphi) = \frac{a\left(1-e^2\right)}{1-e \cdot cos\,\varphi}, \quad (2)$$

где φ — угол поворота; *e* и *a* — эксцентриситет и большая полуось эллипса.

Определим радиусы зацепления колес 5 и 6:

$$BC = \rho_5 = \frac{a\left(1-e_1^2\right)}{1-e_1 \cdot cos\,\varphi_5}, \tag{3}$$

$$CD = \rho_6 = \frac{a\left(1-e_2^2\right)}{1-e_2 \cdot cos\,\varphi_6}, \tag{4}$$

где e_1 и e_2 — эксцентриситеты для каждой пары эллиптических колес, углы поворота которых φ_5 и φ_6 получены следующим образом:

$$\varphi_5 = \int \frac{1-e_1^2}{1+e_1^2+2e_1 \cdot cos\,\varphi_1} d\varphi_1. \tag{5}$$

$$\varphi_6 = \pi + \varphi_5. \tag{6}$$

Опираясь на план скоростей и учитывая уравнения (3), (4), определим искомые отрезки как:

$$BD = \rho_6 - \rho_5, \tag{7}$$

$$AC = EC = 2a, \tag{8}$$

$$DE = 2a - \rho_6. \tag{9}$$

Опираясь на (2)–(9), получим выражение для определения аналога угловой скорости выходного вала:

$$\varphi_3' = \frac{\left(\rho_6 - \rho_5\right) \cdot 2a}{\rho_5\left(2a - \rho_6\right)}. \tag{10}$$

Угол поворота определяется интегрированием уравнения (10) по обобщенной координате φ_1:

$$\varphi_3 = \int \varphi_3' d\varphi_1. \tag{11}$$

Вариациями кинематической схемы механизма является замена эллиптических колес на цилиндрические в одной из пар, для исследования которых необходимо в полученной математической модели функции радиусов заменить на фиксированные значения.

Рассмотрим механизмы с парой эллиптических колес 3–6 (e = 0,28), и цилиндрическими колесами 4 и 5 следующих размеров:

– вариант 1: R_5 = 25 мм, R_4 = 25 мм;

– вариант 2: R_5 = 18 мм, R_4 = 32 мм;

– вариант 3: R_5 = 16 мм, R_4 = 34 мм.

На рис. 2 показаны графики функций положения, полученные с использованием (11).

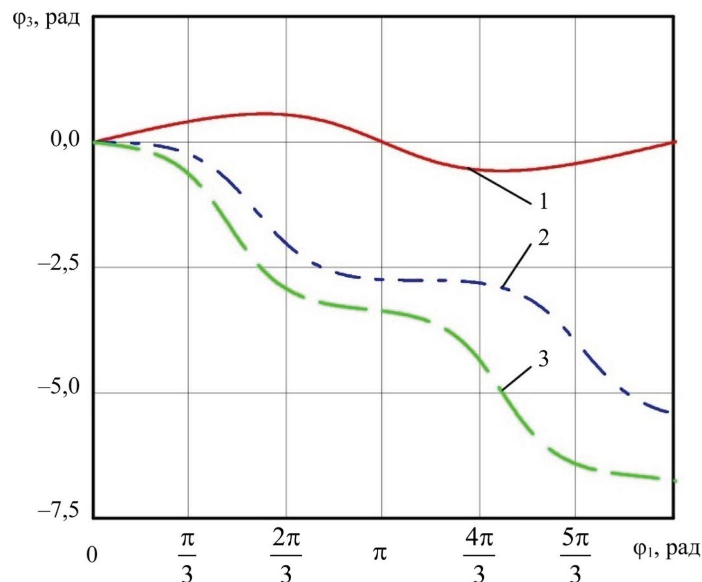


Рис. 2. Графики зависимостей для исследуемых конфигураций механизма

Анализ графиков показывает (на рис. 2 цифрами обозначены исследуемые варианты), что изменение размеров зубчатых колес позволяет получить различные виды движения выходного вала: возвратно-вращательное (вариант 1), прерывистое (вариант 2) и одностороннее неравномерное вращательное движение (вариант 3).

Результаты исследования. Анализ кинематики подтвердил реализацию различных передаточных функций, а изменение размеров зубчатых колес позволяет проводить кинематический синтез новых механизмов.

Объектом экспериментального исследования служит прототип, детали которого показаны на рис. 3.



Рис. 3. Детали исследуемого прототипа

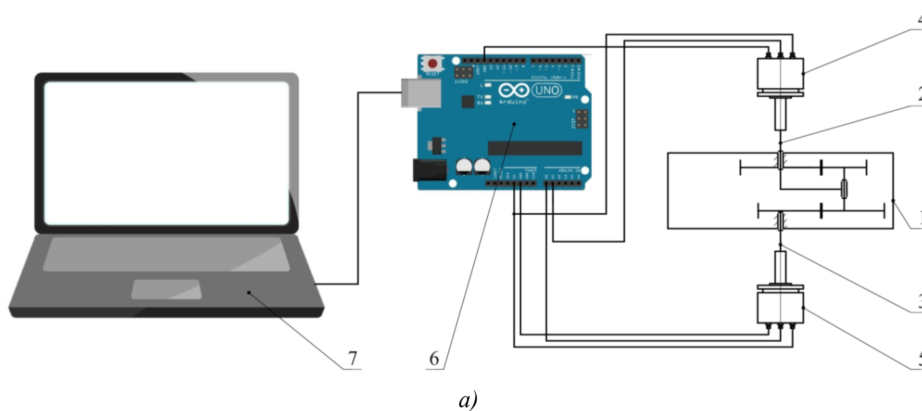
Углы поворота измеряются абсолютными энкодерами (таблица 1).

Таблица 1

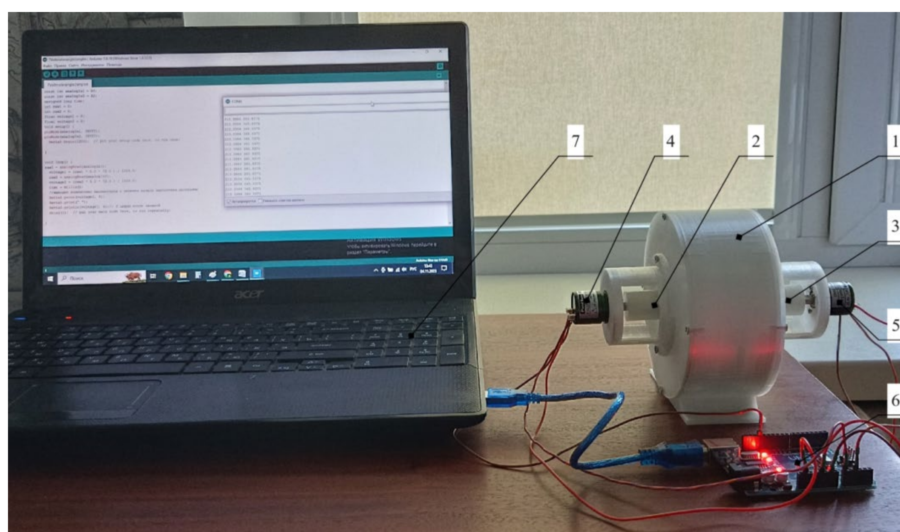
Характеристики энкодеров

Диаметр	Выходной сигнал	Разрешение	Линейность	Скорость чтения
22 мм	0–5 В	360°/ 4096 ≈ 0,088°	0,3 %	0,6 мс

Сигнал регистрируется контроллером Arduino и обрабатывается на ПК (рис. 4).



а)



б)

Рис. 4. Принципиальная схема (*а*) и внешний вид (*б*) экспериментального стенда:
1 — корпус; 2 — входной вал; 3 — выходной вал; 4, 5 — энкодеры; 6 — контроллер Arduino; 7 — персональный компьютер

Обработка и анализ результатов измерений осуществлялись в прикладном пакете MathCAD. Схемы исследуемых вариантов и результаты эксперимента показаны на рис. 5. φ_3,°.

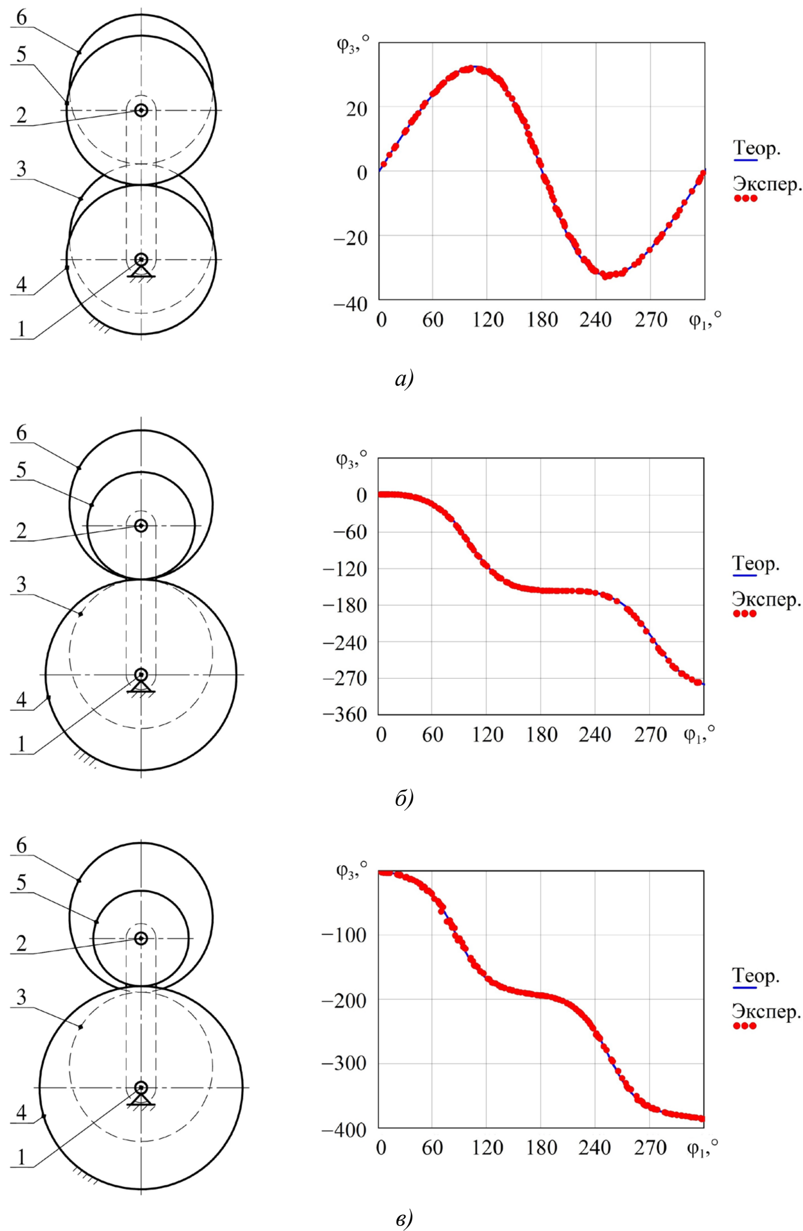


Рис. 5. Результаты исследования: *а* — вариант 1; *б* — вариант 2; *в* — вариант 3

Как видно из графиков, измеренные значения углов поворота выходного вала адекватны построенной модели. Оценим результаты эксперимента инструментами статистического анализа.

Определим среднее значение ошибок измерения [18]:

$$\overline{q} = \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n} q_k, \tag{12}$$

где n — количество независимых наблюдений q_k.

Вычислим выборочную дисперсию:

$$s^2\left(q_k\right) = \frac{1}{n-1}\sum_{k=1}^{n}\left(q_k - \overline{q}\right)^2. \tag{13}$$

Оценку дисперсии среднего значения получим следующим образом:

$$s^2\left(q\right) = \frac{s^2\left(q_k\right)}{n}. \tag{14}$$

Стандартная неопределенность измерений по типу А определится [19]:

$$u\left(q\right) = \sqrt{s^2\left(q\right)}. \tag{15}$$

Принимая за значения q_k ошибки измерения и обрабатывая их согласно (12)–(15), вычислим неопределенность измерения. Результаты статистического анализа приведены в таблице 2.

Таблица 2

Статистический анализ ошибок измерения

Номер механизма	Количество измеренных значений	Среднее значение ошибки	Неопределенность измерения
1	195	–0,16°	0,04°
2	168	0,57°	0,11°
3	192	0,08°	0,13°

Доверительный интервал определяется как $\overline{q} \pm 2u$ для уровня достоверности 95 % и составляет –0,16 ± 0,08 (вариант 1), 0,57 ± 0,22 (вариант 2), 0,08 ± 0,26 (вариант 3). Таким образом, построенная математическая модель кинематики адекватна физическим прототипам.

Обсуждение и заключение. Представлена планетарная передача с эллиптическими колесами, позволяющая реализовать неравномерное, прерывистое и возвратно-вращательное движение выходного вала. Вид движения определяется параметрами зубчатых колес.

Построена кинематическая модель передачи, получен закон движения выходного вала. Анализ механизмов с различными параметрами зубчатых колес показал реализуемость широкого спектра передаточных функций и видов движения выходного вала.

Соответствие результатов проведенного кинематического анализа реальным механизмам подтверждено экспериментальным исследованием функций положения выходного вала для трех вариантов физического прототипа. Проведенная оценка адекватности математической модели позволяет использовать ее при динамическом и силовом анализе машин на базе предлагаемых передач. Исследуемые варианты механизма могут применяться в приводах компактных и простых в уравновешивании технологических машин.

Список литературы / References

1. Lozzi A. Non-Circular Gears — Graphic Generation of Involutes and Base Outlines. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2000;214(3):411–422. https://doi.org/10.1243/0954406001523074

2. Qifeng Gao, Jun Ye, Can Liu. Design and Modeling of Noncircular Gear with Curvature Radius Function. *Journal of Computational Methods in Sciences and Engineering*. 2018;18(3):683–693. https://doi.org/10.3233/JCM-180819

3. Čavić D, Čavić M, Penčić M, Dorić J, Rackov M. IC Engine: Increasing Efficiency by Using Epicyclic Non-Circular Gear Train. In book: Lovasz EC, Maniu I, Doroftei I, Ivanescu M, Gruescu CM. (eds) *New Advances in Mechanisms, Mechanical Transmissions and Robotics*. Cham: Springer; 2020. P. 391–402. https://doi.org/10.1007/978-3-030-60076-1_36

4. JY Liu, SL Chang, D Mundo. Study on the Use of a Non-Circular Gear Train for the Generation of Figure-8 Patterns. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2006;220(8):1229–1236. https://doi.org/10.1243/09544062JMES268

5. Ottaviano E, Mundo D, Danieli GA, Ceccarelli M. Numerical and Experimental Analysis of Non-Circular Gears and Cam-Follower Systems as Function Generators. *Mechanism and Machine Theory*. 2008;43(8):996–1008. https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2007.07.004

6. Okada M, Takeda Y. Synthesis and Evaluation of Non-Circular Gear that Realizes Optimal Gear Ratio for Jumping Robot. In: *Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems.* New York City: IEEE; 2013. P. 5524–5529. https://doi.org/10.1109/IROS.2013.6697157

7. Ke-Jung Huang, Shen-Chiang Chen, Haldun Komsuoglu, Gabriel Lopes, Jonathan Clark, Pei-Chun Lin. Design and Performance Evaluation of a Bio-Inspired and Single-Motor-Driven Hexapod Robot with Dynamical Gaits. *Journal of Mechanisms and Robotics*. 2015;7(3):031017. https://doi.org/10.1115/1.4029975

8. Terada H, Zhu Y, Suzuki M, Cheng C, Takahashi R. Developments of a Knee Motion Assist Mechanism for Wearable Robot with a Non-Circular Gear and Grooved Cams. In book: Lovasz EC, Corves B. (eds) *Mechanisms, Transmissions and Applications*. Dordrecht: Springer; 2012. P. 69–76. https://doi.org/10.1007/978-94-007-2727-4_6

9. Guo LS, Zhang WJ. Kinematic Analysis of a Rice Transplanting Mechanism with Eccentric Planetary Gear Trains. *Mechanism and Machine Theory*. 2001;36(11–12):1175–1188. https://doi.org/10.1016/S0094-114X(01)00052-0

10. Zhao Y, Yu GH, Wu CY. Circuit Simulation and Dynamic Analysis of a Transplanting Mechanism with Planetary Elliptical Gears. *Transactions of the ASABE*. 2011;54(4):1179–1188. https://doi.org/10.13031/2013.39016

11. Wunderlich W. Contribution to the Geometry of Elliptic Gears. *Mechanism and Machine Theory*. 1975;10(4):273–278. https://doi.org/10.1016/0094-114X(75)90072-5

12. Shinn-Liang Chang, Chung-Biau Tsay, Long-Iong Wu. Mathematical Model and Undercutting Analysis of Elliptical Gears Generated by Rack Cutters. *Mechanism and Machine Theory*. 1996;31(7):879–890. https://doi.org/10.1016/0094-114X(95)00121-E

13. Biing-Wen Bair. Computerized Tooth Profile Generation of Elliptical Gears Manufactured by Shaper Cutters. *Journal of Materials Processing Technology*. 2002;122(2–3):139–147. https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)01242-0

14. Yazar M. Design, Manufacturing and Operational Analysis of Elliptical Gears. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 2021;22(8):1441–1451. https://doi.org/10.1007/s12541-021-00549-3

15. Thai Hong Nguyen. Shaping the Tooth Profile of Elliptical Gear with the Involute Ellipse Curve. *VNUHCM Journal of Engineering and Technology*. 2021;4(3):1048–1056. https://doi.org/10.32508/stdjet.v4i3.820

16. Литвин Ф.Л. *Некруглые зубчатые колеса*. Москва-Ленинград: Машгиз; 1956. 220 с.

Litvin FL. *Non-Circular Gears*. Moscow-Leningrad: MASHGIZ; 1956. 218 p. (In Russ.).

17. Prikhod'ko AA, Smelyagin AI. Kinematics of a Planetary Train with Elliptical Gears with Internal Gearing. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability.* 2021;50(5):412–418. https://doi.org/10.3103/S1052618821050095

18. Hall BD, White DR. *An Introduction to Measurement Uncertainty*. Lower Hutt: Measurement Standards Laboratory of New Zealand; 2020. 50 p. https://doi.org/10.5281/zenodo.3872590

19. Бараш В.Я. Неопределенность и погрешность в современной метрологии. *Законодательная и прикладная метрология*. 2009;105(5):15–20.

Barash VYa. Uncertainty and Error in Modern Metrology. *Legal and Applied Metrology*. 2009;105(5):15–20. (In Russ.)

Об авторах:

Александр Александрович Приходько, кандидат технических наук, доцент кафедры технической механики и специальных машин имени профессора А.А. Петрика Кубанского государственного технологического университета (350072, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Московская, 2), SPIN-код, ORCID, ResearcherID, sannic92@gmail.com

Наталия Николаевна Белина, кандидат технических наук, доцент кафедры технической механики и специальных машин имени профессора А.А. Петрика Кубанского государственного технологического университета (350072, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Московская, 2), SPIN-код, ORCID, belinann@mail.ru

Андрей Владимирович Новицкий, аспирант кафедры технической механики и специальных машин имени профессора А.А. Петрика Кубанского государственного технологического университета (350072, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Московская, 2), SPIN-код, ORCID, novitskiy_19@mail.ru

Максим Максимович Щетинин, студент кафедры технической механики и специальных машин имени профессора А.А. Петрика Кубанского государственного технологического университета (350072, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Московская, 2), ORCID, maks.shchetinin202@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

А.А. Приходько: научное руководство, формирование основной концепции, цели и задачи исследования, доработка текста, корректировка выводов.

Н.Н. Белина: проведение расчетов, подготовка текста, формирование выводов.

А.В. Новицкий: разработка и изготовление экспериментального стенда, оформление расчетной части научной статьи.

М.М. Щетинин: обработка экспериментальных данных, оформление экспериментальной части научной статьи.

Конфликт интересов: **авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Alexander A. Prikhodko, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Technical Mechanics and Special Machines named after Professor A.A. Petrik, Kuban State Technological University (2, Moskovskaya Str., Krasnodar, 350072, Russian Federation), SPIN-code, ORCID, ResearcherID, sannic92@gmail.com

Nataliya N. Belina, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Technical Mechanics and Special Machines named after Professor A.A. Petrik, Kuban State Technological University (2, Moskovskaya Str., Krasnodar, 350072, Russian Federation), SPIN-code, ORCID, belinann@mail.ru

Andrey V. Novitskiy, postgraduate student of the Department of Technical Mechanics and Special Machines named after Professor A.A. Petrik, Kuban State Technological University (2, Moskovskaya Str., Krasnodar, 350072, Russian Federation), SPIN-code, ORCID, novitskiy_19@mail.ru

Maksim M. Shchetinin, student of the Department of Technical Mechanics and Special Machines named after Professor A.A. Petrik, Kuban State Technological University (2, Moskovskaya Str., Krasnodar, 350072, Russian Federation), ORCID, maks.shchetinin202@mail.ru

Claimed Contributorship:

AA Prikhodko: academic advising, basic concept, research objectives and tasks formulation, revision of the text, correction of the conclusions.

NN Belina: computational analysis, text preparation, formulation of conclusions.

AV Novitskiy: development and making of an experimental stand, design of the calculation part of the paper.

MM Shchetinin: processing of the experimental data, preparation of the experimental part of the paper.

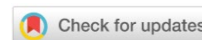
Conflict of Interest Statement: **the authors claimed no conflict of interest.**

All authors have read and approved the final manuscript.

Поступила в редакцию / Received 25.09.2024
Поступила после рецензирования / Reviewed 20.10.2024
Принята к публикации / Accepted 29.10.2024

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE





УДК 621.793 + 06
https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-4-369-391

Систематический обзор

Анализ технологий нанесения высокоэнтропийных покрытий методом физического осаждения



EDN: JQMJHZ

К.Н. Политыко ✉, **И.В. Колесников**, **Д.С. Мантуров**
Ростовский государственный университет путей сообщения, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация
✉ politykokirill@yandex.ru

Аннотация
Введение. Современная трибология решает задачи повышение надежности узлов трения с помощью нанесения вакуумных износостойких покрытий методом физического осаждения (англ. physical vapor deposition, PVD). Высокоэнтропийным сплавам (ВЭС) посвящены более 5 тыс. научных трудов. Однако оставался открытым актуальный вопрос о возможности получения износостойких и антифрикционных высокоэнтропийных покрытий (ВЭП) PVD-методом. Его решение открывает возможность применения ВЭП в машиностроении. Представленная статья призвана восполнить указанный пробел. Задачи исследования: обозначить основные результаты работ по созданию ВЭП такими PVD-методами, как вакуумно-дуговое испарение и магнетронное распыление; установить трибологические характеристики PVD-покрытий.
Материалы и методы. С ноября 2023 года по февраль 2024-го авторы проанализировали материалы на русском и английском языках, опубликованные в базах Web of Science, Elibrary, Scopus, Medline, CINAHL.
Результаты исследования. На первом этапе рассматривалась литература о вакуумно-дуговом методе нанесения покрытий. Изучались вопросы создания вакуумно-дугового разряда, его технологические особенности, недостатки, а также процессы в катодной области дуги. Отмечены условия существования катодных пятен, влияние температуры на коэффициент эрозии, процессы на аноде и подложке. Показана зависимость скорости осаждения от значения потенциала на подложке. Анализируются нитридные и комбинированные покрытия, полученные вакуумно-дуговым методом: TiN, TiCN, TiAlN, TiMoS, TiSiN, TiN/VN, TiAlN/DLC-Ti.
На втором этапе представлена история магнетронного метода распыления, описываются технологические особенности, виды магнетронов и полученные таким образом нитридные покрытия.
Третий этап посвящается пятиэтапному процессу формирования структуры покрытия. Рассматриваются механизмы роста покрытий: островковый, послойный, смешанный. Дается схематическое изображение фундаментальных процессов структурообразования. Отмечаются дефекты в вакуумных покрытиях.
На четвертом этапе представлено ВЭП на базе ВЭС. Указаны параметры, предсказывающие образование твердого раствора ВЭС. Рассматриваются шесть семейств высокоэнтропийных сплавов. Оцениваются современные высокоэнтропийные покрытия, полученные вакуумно-дуговым и магнетронным методами. Обобщаются в виде таблицы результаты исследований структурно-фазовых и физико-механических свойств. Приводятся данные трибологических исследований высокоэнтропийных покрытий.
Обсуждение и заключение. В литературе о ВЭП описываются структура покрытия, физико-механические свойства, термическая устойчивость. Авторы представленной статьи обнаружили пробел в исследованиях трибологии высокоэнтропийных покрытий. Из известных результатов можно сделать вывод, что данные покрытия относятся к фрикционными. Однако из-за высокой твердости и пластичности они демонстрируют высокую износостойкость. К тому же сложно говорить об их трибологическом назначении. Для решения вопроса о возможности применения PVD-покрытий в машиностроении следует уделить внимание разработке составов с высокой твердостью, износостойкостью и низким коэффициентом трения. Их можно будет эксплуатировать в трибонагруженных узлах.

Ключевые слова: высокоэнтропийные покрытия, высокоэнтропийные сплавы, PVD-покрытия, вакуумно-дуговой метод, магнетронный метод

Благодарности. Авторы благодарят О.В. Кудрякова, д.т.н., профессора, а также редакционную коллегию журнала и анонимных рецензентов за конструктивные замечания, позволившие улучшить статью.

Финансирование. Исследование выполнено в Ростовском государственном университете путей сообщения за счет гранта Российского научного фонда в рамках проекта № 21–79–30007 «Создание триботехнических материалов и покрытий нового поколения на основе интеллектуальной (цифровой) технологии синтеза». № гос. рег. — 121052000109–9.

Для цитирования. Политыко К.Н., Колесников И.В., Мантуров Д.С. Анализ технологий нанесения высокоэнтропийных покрытий физическим методом осаждения. *Advanced Engineering Research* (*Rostov-on-Don.* 2024;24(4):369–391. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-4-369-391

Systematic Review

Analysis of Technologies for Applying High-Entropy Coatings by Physical Deposition Method

Kirill N. Polityko ✉, Igor V. Kolesnikov, Dmitry S. Manturov
Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russian Federation
✉ politykokirill@yandex.ru

Abstract

Introduction. Modern tribology solves the problems of increasing the reliability of friction units through applying vacuum wear-resistant coatings by the physical vapor deposition (PVD) method. More than five thousand scientific papers are devoted to high-entropy alloys (HEA). However, an urgent question about the possibility of obtaining wear-resistant and antifriction high-entropy coatings (HEC) using the PVD method remains unsolved. Its solution opens up the possibility of using HEC in mechanical engineering. The presented article is intended to fill this gap. Research objectives are as follows: to identify the key results on the creation of HEC by such PVD methods as vacuum arc evaporation and magnetron sputtering, to establish tribological characteristics of PVD coatings.

Materials and Methods. From November 2023 to February 2024, the authors analyzed materials published in the Web of Science, Elibrary, Scopus, Medline, CINAHL databases in the Russian and English languages.

Results. At the first stage, the literature on the vacuum arc coating method was considered. The issues of creating a vacuum arc discharge, its technological features, disadvantages, as well as processes in the cathode region of the arc were studied. The conditions of existence of cathode spots, the influence of temperature on the erosion coefficient, and processes on the anode and substrate were noted. The dependence of the deposition rate on the value of the potential on the substrate was shown. Nitride and combined coatings obtained by vacuum-arc method were analyzed: TiN, TiCN, TiAlN, TiMoS, TiSiN, TiN/VN, TiAlN/DLC-Ti.

At the second stage, the history of the magnetron sputtering method was presented; technological features, types of magnetrons and nitride coatings obtained in this way were described.

The third stage was devoted to the five-stage process of forming the coating structure. Island, layer-by-layer, and mixed growth modes of coating were considered. A schematic representation of the fundamental processes of structure formation was given. Defects in vacuum coatings were noted.

At the fourth stage, the HEC based on the HEA were presented. Parameters predicting the formation of a HEA solid solution were indicated. Six families of high-entropy alloys were considered. Modern high-entropy coatings obtained by vacuum arc and magnetron methods were evaluated. The results of studies of structural-phase and physico-mechanical properties were summarized in the form of a table. The data of tribological studies of high-entropy coatings were presented.

Discussion and Conclusion. The literature on HEC describes the coating structure, physical and mechanical properties, and thermal stability. The authors of the presented article found a gap in the research of tribology of high-entropy coatings. From the known results, it can be concluded that these coatings are frictional. However, due to their high hardness and ductility, they exhibit high wear resistance. In addition, it is difficult to talk about their tribological purpose. To solve the issue of the possibility of using PVD coatings in mechanical engineering, attention should be paid to the development of compositions with high hardness, wear resistance, and low coefficient of friction. They can be operated in tribo-loaded nodes.

Keywords: high-entropy coatings, high-entropy alloys, PVD coatings, vacuum arc method, magnetron method

Acknowledgements. The authors would like to thank O.V. Kudryakov, Dr.Sci. (Engineering), Professor, as well as the Editorial board and reviewers for their attentive attitude to the article, and for the above comments, which made it possible to improve its quality.

Funding Information. The research was done at Rostov State Transport University with the financial support from the Russian Science Foundation within the project "Creation of Tribotechnical Materials and Coatings of a New Generation Based on Intelligent (Digital) Synthesis Technology", State Reg. No. 121052000109–9 (Grant No. 21–79–30007).

For Citation. Polityko KN, Kolesnikov IV, Manturov DS. Analysis of Technologies for Applying High-Entropy Coatings by Physical Deposition Method. *Advanced Engineering Research* (*Rostov-on-Don*). 2024;24(4):369–391. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-4-369-391

Введение. В современной трибологии актуальны вопросы повышения надежности, износостойкости и долговечности узлов трения. Часто заявленные задачи решаются нанесением на трибоконтакт тонких износостойких покрытий. Известны различные подходы к упрочнению поверхностей трения, и о них идет речь в представленном обзоре. Особое внимание уделяется физическому методу осаждения (physical vapor deposition, PVD). Высокий уровень технологий PVD позволяет наносить покрытия на поверхность трения с такой структурой и свойствами, которые могут «приспосабливаться» к условиям трения в широком диапазоне нагрузок и скоростей. При этом все еще не сформирован системный подход к выбору материалов и режимов технологии нанесения PVD. Данная научная работа призвана отчасти восполнить этот пробел. В статье представлен обзор литературы о методах нанесения PVD-покрытий на поверхность трибоконтакта модифицированных и многокомпонентных слоев.

Первые PVD-покрытия появились в начале прошлого века и широко используются в различных отраслях промышленности. Метод базируется на испарении материала катода в высоком вакууме (до 10^{-4} Па). Вакуум способствует переходу материала из твердого состояния в плазменное в среде инертных газов (Ar, N_2, O_2, C_2H_2, H_2 и др.). С помощью плазмы испаряемый материал переносится к образцу, на котором формируется и растет структура покрытия. Для физической реализации метода осаждения можно воспользоваться различным оборудованием, способами и технологиями. Назовем некоторые, с собственными источниками нагрева и способами ускорения частиц: термическое испарение, молекулярно-пучковая эпитаксия, ионная имплантация, вакуумно-дуговое осаждение, магнетронное распыление. Два последних метода особенно широко используются [1].

Требования, предъявляемые к поверхности подложки, обусловлены тем, что PVD-покрытие в точности воспроизводит ее рельеф. При разветвленном рельефе и высокой шероховатости поверхности в растущем (по толщине) покрытии быстро накапливаются внутренние напряжения — причины трещин и отслоений. Поэтому показатель чистоты поверхности подложки должен быть не ниже 10-го класса (R_a≤0,12 мкм; R_z≤0,6 мкм) по ГОСТ 2789–73[1]. Это соответствует полированной поверхности стали.

Значительный вклад в развитие технологии нанесения износостойких покрытий методом физического осаждения внесли С.Н. Григорьев, С.В. Федоров, А.К. Синельщиков, В.П. Жедь, В.И. Колесников, А.И. Григоров, Ю.Г. Кабалдин, А.В. Белый, Г.Д. Карпенко, И.П. Третьяков, Л.С. Саблев, И.И. Аксенов, А.А. Андреев, В.Г. Падалка [2].

Исследуемый процесс проходит несколько стадий [3].

1. Испарение материала (переход из твердого состояния в парообразное).
2. Перенос паров материала с помощью инертных газов к образцу.
3. Бомбардировка поверхности подложки частицами материала в паровой фазе с образованием адгезионной связи.
4. Зарождение и рост покрытия.

В машиностроении широко применяются решения ведущих мировых компаний — разработчиков PVD-покрытий. Их новации задействуют для упрочнения, уменьшения коэффициента трения, защиты деталей от коррозии.

Материалы и методы. В рамках представленной работы изучались и реферировались материалы на русском и английском языках, опубликованные в базах Web of Science, eLibrary, Scopus, Medline и CINAHL. Формируя запросы по ключевым словам, авторы отказались от рандомного выбора источников в пользу системного подхода и руководствовались структурированным перечнем вопросов, которые намеревались рассмотреть. Так, например, получив полное представление о том, как в теоретической и прикладной литературе описываются начальные стадии процесса покрытия, авторы вводили новые запросы, чтобы получить материалы о следующих этапах. Такой метод позволил создать репрезентативную выборку источников для решения задач данного исследования. Собранные данные обрабатывались методом воронки. Первое сужение воронки сформировало структуру данной статьи, выявило базовые темы реферирования:

– вакуумно-дуговой метод осаждения покрытий;
– процессы в катодной области дуги;
– процессы на аноде и подложке;
– покрытия, полученные с помощью вакуумно-дугового метода;
– магнетронный метод распыления;
– рост покрытий и механизмы формирования структуры;

[1] ГОСТ 2789–73. *Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики.* Москва: Стандартинформ; 2006. 8 с. URL: http://www.omegametall.ru/Data2/1/4294847/4294847701.pdf (дата обращения: 29.07.2024).

– свойства высокоэнтропийных сплавов;

– состав высокоэнтропийных сплавов и покрытий;

– методы исследования высокоэнтропийных покрытий.

Следующие сужения воронки позволили сфокусироваться на параметрах процессов и материалов, от которых зависят качества покрытий, потенциально пригодных для использования в машиностроении (например, термостойкость, твердость, адгезионная прочность). Численные данные обобщались в виде таблиц. Для визуализации основных процессов использовали иллюстрации, в том числе созданные авторами данной статьи. На определенном этапе данной работы авторы получили достаточное представление о количестве и объемах исследований, посвященных той или иной технологии. Они оказались различными. Подсчеты, сопоставление и дополнительный целенаправленный поиск позволили сделать вывод о дефиците работ, рассматривающих данную проблематику с точки зрения трибологии.

Результаты исследования

Вакуумно-дуговой метод осаждения покрытий. Вакуумно-дуговой разряд — это самостоятельный разряд [4]. Он развивается в парах материала катода. При этом на поверхности самого катода формируются катодные пятна (КП) размером 10^{-6}–10^{-3} м [5]. В них за счет взрывной эмиссии электронов быстро достигается температура кипения материала, и он испаряется [6]. На рис. 1 представлена схема вакуумно-дугового метода нанесения покрытий.

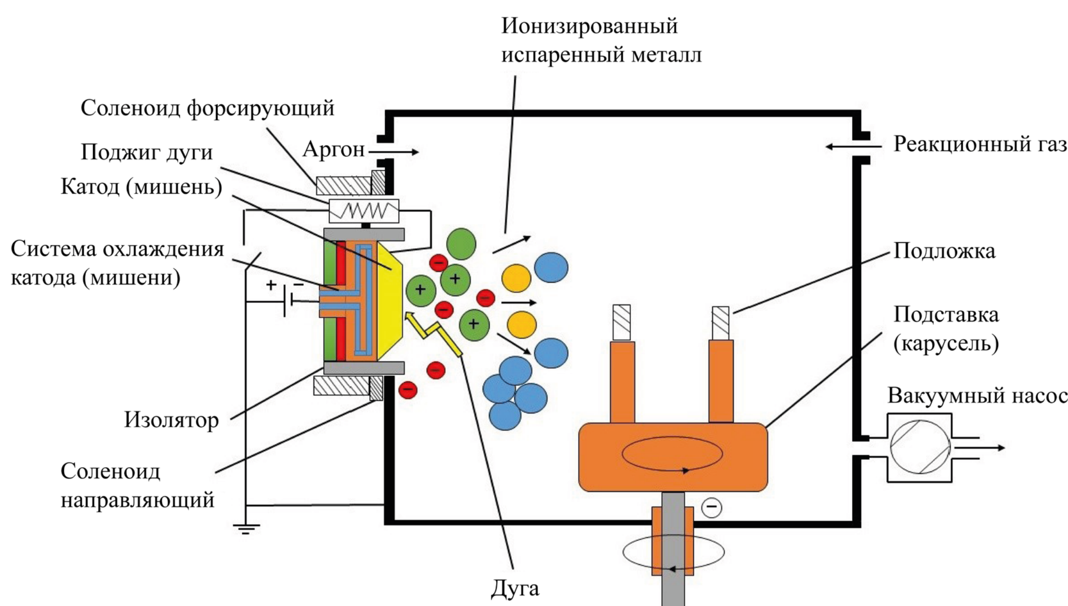


Рис. 1. Схема вакуумно-дугового метода нанесения покрытий

Сотрудничество академических институтов и вузов России заметно повлияло на становление теории и практики нового направления. Активно развиваются вакуумно-дуговые технологии и в зарубежных исследовательских центрах: Национальной лаборатории им. Лоуренса в Беркли (США), Сиднейском технологическом университете (Австралия), Кембриджском университете (Великобритания), Институте материалов и лучевых технологий Фраунгофера (Германия), Уханьском научно-технологическом университете (Китай) и др. [2].

Основной узел вакуумно-дуговых установок — электродуговой испаритель. Для бесперебойной работы при нанесении покрытий необходимы надежный запуск испарителя, стабильный дуговой разряд в заданном значении тока, локализация катодных пятен. Важно также иметь простую конструкцию для быстрой замены поджигов и катодов и не превышать минимум капельной фазы в потоках плазмы [2].

Авторы проанализировали данный метод нанесения покрытий и отметили недостаток — образование капельной фазы размером 0,1–40 мкм. Из-за этого формируется неоднородность поверхности, которая обусловливает:

– повышение шероховатости;

– низкое значение адгезии покрытия с подложкой;

– образование внутренних напряжений.

Указанные недостатки способствуют образованию дефектов структуры. Для уменьшения капельной фазы используют сепарацию плазменного потока с помощью магнитного поля и оптимизацию электрических параметров установки для нанесения вакуумных покрытий.

Процессы в катодной области дуги. КП содержат продукты эрозии, для которых характерны три фазы: микрокапельная, паровая, ионизированная [7]. Последняя преобладает, если речь идет об испарении в катодах, изготовленных из тугоплавких материалов [8]. В катодах из легкоплавких металлов на ионизованную фазу приходится до 10 % [9]. Отметим, что в потоке плазмы молибденовой дуги на ионизированную фазу приходится 80–90 % от всех фаз [10].

Г.А. Месяц и др. [8] разработали эктонную теорию, которая описывала процессы в катодной области вакуумной дуги. Согласно данной теории, начало цикла КП — взрывная эмиссия электронов (ВЭЭ), которая способствует появлению плазмы. Разность потенциала между электрическим разрядом и плазмой называют катодным падением потенциала (КПП). Его значение близко к значению потенциала ионизации металла — и это главная особенность описываемого явления. Для определения переносимых через КП токов используют две их характеристики — минимальный ток и среднее значение. Минимальный (пороговый) ток — ток, при котором существуют КП и дуга. Параметры КПП и пороговый ток — это основные характеристики катодной области и дугового разряда [11].

Катодные пятна бывают трех видов. Первый наблюдается в начале дугового разряда и движется со скоростью 100–150 м/с [12]. Для второго характерны более чем двукратное увеличение испарения и перемещения со скоростью 50–75 м/с [13]. Третий тип КП считается самым вредоносным и влияет на образование капельной фазы в вакуумно-дуговых установках. Размер ячеек КП зависит от материала катода. Например, авторы [14], изучая образование КП, пришли к выводу, что для медного катода размер КП около 50–80 мкм. Он состоит из фрагментов 5–30 мм и приносит ток величиной 10–30 А. Жизненный цикл КП примерно 10^{-7}–10^{-9} с в кратерах диаметром от 1 мкм. При этом на расстоянии от катода $2{\cdot}10^{-4}$ см будут увеличиваться кратность и ускорение ионов.

Авторы [15] определили, что при распаде одних ячеек в КП генерируются другие. Процесс может происходить и вне границ данного КП, но в пределах его плазменного ореола. Так образуются другие ячейки и, следовательно, — новое КП. В [15] делается вывод, что КП перемещаются на расстояние до 300 мкм. При увеличении тока разряда растут количество и размеры ячеек КП. Затем КП делится на фрагменты, которые будут отталкиваться друг от друга [10].

В начале XX века Дж. Штарк установил, что при наличии магнитного поля перпендикулярно перемещению КП оно движется против действия силы Ампера [16]. В случае с КП 1-го типа возникнет сильный плазменный поток со скоростью 5–10 км/с. Ореол, образованный при КП 2-го типа, имеет свечение плазмы и движется в обратную сторону.

Из [17] известны условия изменения скорости перемещения КП. Она растет, если увеличиваются индукция магнитного поля и ток разряда, проходящего через катод. Она падает при повышении температуры и тока дуги.

Р. Танберг установил, что ячейки КП испускают плазменные струи со скоростью $(1–2){\cdot}10^{6}$ см/с. Скорость зависит от материла катода и электрических параметров вакуумной установки. Танберг определил состав плазменных струй: электроны, ионы, капли материала катода и нейтральные атомы [18].

Рассматривая работу ячеек КП, отметим, что расход массы катода напрямую зависит от продуктов эрозии и фазы. В ионизованной фазе расход будет постоянным, но при появлении капельной фазы он увеличится в соответствии с повышением разряда, который проходит через КП [2]. Коэффициент эрозии зависит от тока, температуры и материала катода (в легкоплавких материалах разрушение идет быстрее, чем в тугоплавких).

В [19] рассматривается зависимость коэффициента эрозии ($К_э$) от температуры испарения для Al, Cu, нержавеющей стали и карбида титана. Установлено, что $К_э$ для Al, Cu и нержавеющей стали зависит от температуры испарения, а для карбида титана в заданном диапазоне температур испарения $К_э$ практически не увеличивается. Это можно объяснить тем, что эрозия в данном случае есть процесс интенсивного испарения катода за счет неравномерного магнитного поля тугоплавких материалов.

Для уменьшения коэффициента эрозии нужно наносить покрытие при увеличении давления 10^{-3}–10^{1} Па. При этом будет активно образовываться 1-й тип КП, что приведет к большему возврату испаренных частиц на поверхность катода. Данное явление реже замечается у 2-го типа КП. Из этого можно заключить, что коэффициент эрозии у 1-го типа КП меньше, чем у 2-го. Если рассматривать пару «газ — металл», то максимальное снижение расхода массы катода происходит при увеличении тока разряда и зависит от образуемых соединений газа с испаряемым материалом [20].

Таким образом, рассмотрев особенности образования вакуумно-дугового разряда и катодных пятен, можно сделать вывод, что для стабильной реализации вакуумно-дугового осаждения следует подобрать материалы катода с близкими значениями порогового тока вакуумно-дугового разряда.

Процессы на аноде и подложке. При нанесении анода конденсируется пар испаряющегося с поверхности катода. Анод получает энергию плазмы. При этом его поверхность должна обладать теплоотводом в анод и совершать обратное излучение в плазму с последующим испарением материала анода [21].

Нужно уменьшить размер анода, чтобы разогреть его до температуры плавления и испарения. В данном случае можно наносить покрытия из материала анода с относительно высокой адгезией. При охлаждении анода до комнатной температуры на его поверхности образуются хрупкие пористые покрытия с высокой концентрацией внутренних напряжений.

Энергия ионов, бомбардирующих подложку, состоит из их начальной энергии и энергии, приобретенной в дебаевском слое, примыкающем к подложке, при приложении к ней отрицательного потенциала [1]:

$$E_i = E_0 + ezU_п, \tag{1}$$

где E_i — энергия иона; E_0 — начальная энергия; Z — кратность заряда иона; $U_п$ — потенциал подложки.

Авторы [22] выявили зависимость скорости осаждения от потенциала подложки при нанесении плазменных потоков хрома, молибдена, циркония и титана (рис. 2).

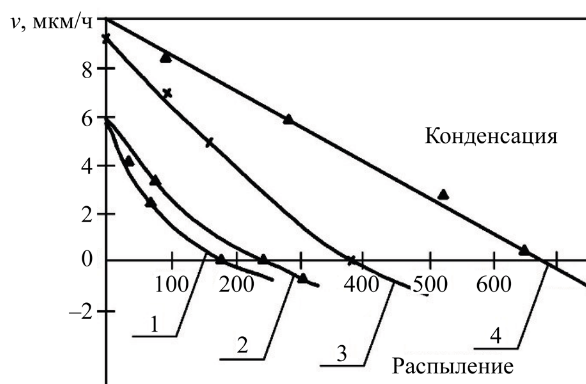


Рис. 2. Зависимость скорости осаждения (распыления) от потенциала подложки при взаимодействии с потоками плазмы хрома (1), молибдена (2), циркония (3) и титана (4). Материал подложки — сталь 30, давление азота — $2{,}66{\cdot}10^{-3}$ Па [22]

Из рис. 2 можно сделать вывод, что значение потенциала, при котором процессы конденсации и распыления приходят в равновесие, зависит от природы испаряемого материала. При увеличении значения потенциала подложки ее материал и осаждающиеся частицы распыляются. Удаление атомов подложки (загрязнений) ведет к повышению ее температуры. Бомбардировка пластин из твердых сплавов ионами хрома и титана в высоком вакууме при потенциале 1 000 В за несколько минут увеличивает их среднюю прочность на изгиб на 10–15 % и снижает вариационные разбросы прочности на 40–80 % [23]. При последующем нанесении покрытия образуется диффузионная зона шириной до 2–2,5 мкм. Такая обработка обеспечивает высокую адгезию покрытия к подложке и дает возможность закаливать сталь с вакуумно-дуговыми покрытиями без потери их физико-механических характеристик [14]. При повышении давления газа снижаются интенсивность распыления и скорость. Так происходит при напуске активного газа, который образует соединения с испаряемым газом.

Покрытия, полученные с помощью вакуумно-дугового метода. Вакуумно-дуговой метод (ВДМ) применяют для получения износостойких защитных покрытий с высокими физико-механическими характеристиками и низким коэффициентом трения. За годы развития вакуумных технологий ученые разработали множество видов покрытий для различных отраслей машиностроения. Самые известные покрытия — нитридные (TiN, TiCN, TiAlN, TiMoN, TiSiN) и нанослойные композиционные (TiN/NbN, TiN/AlN, CrN/TiN, TiN/AlTiN). С недавнего времени актуальна разработка многокомпонентных высокоэнтропийных покрытий.

Широко изучены покрытия, полученные ВДМ на основе TiN с содержанием азота 37,5–52 ат.%. Их главная особенность — ячеистый микрорельеф с размером ячеек 0,5–3 мкм. Покрытие может содержать две фазы: Ti_2N с гексагональной плотноупакованной (ГПУ) решеткой и TiN с гранецентрированной кубической (ГЦК) решеткой. Другая характеристика покрытия — столбчатая структура. Диаметр столбов — 200 нм, зерна диаметром 25–75 нм вытянуты в сторону роста [2].

В нитридных покрытиях азот влияет на микротвердость. При увеличении давления азота в камере микротвердость повышается до 35–53 ГПа, а при дальнейшем увеличении снижается до 20–24 ГПа. Это объясняется уменьшением активации частиц азота при давлении более 1 Па [2]. Отметим, что электропроводность покрытий, о которых идет речь, зависит от содержания азота. Коэффициент трения определяется влажностью. Если она низкая (10 %), то коэффициент трения по хромистой стали достигает 0,8, при влажности 50 % — около 0,6, а при приработке — около 0,2.

Покрытия TiCN (карбонитриды титана) образуются смешиванием N_2 с C_2H_2 или CH_4. Они имеют столбчатую структуру с шириной столбцов 260 нм. При добавлении ацетилена микротвердость увеличивается до 50 ГПа. Карбонитриды титана почти в два раза сильнее сопротивляются эрозии (если сравнивать с покрытием TiN) [24].

Покрытия $Ti_{1-x}Al_xN$ представляют собой твердые растворы замещения с кубической решеткой типа B1 TiN при $0 \le x \le 0{,}6$. Они обладают высокой стойкостью к окислению при высоких температурах. Микротвердость возрастает до 30 ГПа при увеличении алюминия в составе покрытия и образования нитрида алюминия [25]. Авторы [26] установили, что при нанесении покрытия $Ti_{50}Al_{50}N$ с уменьшением опорного напряжения от –300 В до –150 В снижается концентрация алюминия в составе покрытия, и это влияет на микротвердость. При уменьшении опорного напряжения на 30 В значение микротвердости увеличилось с 29,1 до 34,5 ГПа.

Авторы [27] наносили покрытие TiN вакуумно-дуговым методом и вводили в него MoS_2, распыляя дисульфид молибдена магнетронным методом. Установлено, что при вводе MoS_x значительно (до 30 ГПа) увеличивается твердость. Коэффициент трения снижается до 0,15, интенсивность износа уменьшается в 20 раз.

Покрытия TiSiN вызвали интерес ученых, потому что Si — легирующий элемент нитридов переходных металлов. Он химически родственен азоту и обладает малым атомным радиусом (если говорить о переходных металлах). Именно поэтому покрытия TiSiN обладают высоким значением микротвердости (30–45 ГПа) и низким модулем упругости (200–250 ГПа). При трибологических испытаниях кремний образует соединение SiO_2, и эта твердая смазка снижает коэффициент трения до 0,5 [28].

При создании нанослойных композиционных покрытий чередуются слои металлов с различными физико-механическими свойствами, но близкими коэффициентами термического расширения. Авторы [29] исследовали нанослойные композиционные покрытия из материалов с нанотвердостью ~20 ГПа. У покрытия TiN/NbN выявили высокую нанотвердость. Нанотвердость покрытия TiN/VN составила 55 ГПа, и это очень высокий показатель для нанослойного покрытия.

Применение вакуумно-дугового метода актуально при создании комбинированных покрытий MeC(MeN)/a-C:H с чередованием нитридных и углеродных слоев. Так, в [30] сравниваются покрытия TiAlN/DLC-Ti с DLC-Ti. Износостойкость комбинированных покрытий оказался в два раза выше, чем у DLC-Ti, за счет увеличение нанотвердости до 24 ГПа и модуля Юнга до 230 ГПа.

В [31] исследуется влияние ионной имплантации на адгезионную прочность покрытий TiN и Ti. Перед нанесением покрытия TiN с подслоем Ti подложку из стали У8А облучали ионами аргона с дозами от 0 до 10^{17} ион/см^2. Для TiN, полученного на облученной подложке до 10^{17} ион/см^2, адгезионная прочность возросла до 11,3 Н. Это в два раза больше, чем адгезионная прочность TiN на необлученной подложке. В случае монопокрытия Ti установлено, что на образце без имплантации отслаивание происходит при минимальных нагружениях индентора, а при облучении $3 \cdot 10^{16}$ и $1{,}5 \cdot 10^{17}$ ион/см^2 адгезионная прочность увеличивается на 1,8–2,5 Н. Данные значения характерны для мягких покрытий, к которым относится титан. Таким образом, ионная имплантация подложки увеличивает адгезионную прочность покрытий TiN и Ti.

В [32] вакуумно-дуговым методом получили покрытия MoTiN и MoCuN и определили адгезионную прочность с помощью скретч-тестирования. Установлено, что покрытия MoTiN обладают твердостью до 40 ГПа и адгезионной прочностью до 22 Н. Это значительно больше, чем у MoCuN. Его твердость не превысила 22 ГПа, адгезионная прочность оказалась не более 4 Н. Авторы [32] объясняют результаты формируемой структурой покрытий. В первом случает образуется твердый раствор на базе нитрида титана TiN, во втором — смесь нитрида молибдена Mo_2N и свободной меди.

Итак, обзор литературы о покрытиях, полученных с помощью вакуумно-дугового метода, позволяет сделать определенные выводы. Такие покрытия используются для защиты поверхности различных инструментов. Если речь идет о тяжело нагруженных узлах трения, задействуют износостойкие и антифрикционные покрытия. Можно использовать разные материалы и совмещать технологии нанесения для получения комбинированных покрытий типа $TiMoS_xN$, MeC(MeN)/a-C:H.

Магнетронный метод распыления. Магнетронное распыление предполагает бомбардировку поверхности мишени высокоэнергетическими ионами рабочего газа (Ar, N_2, O_2, CH_4) в тлеющем разряде в вакууме 10^{-3}–10^{-2} Па при температуре 100–250 °C. Это один из самых распространенных методов получения тонких пленок. При распылении атомов мишени излучаются вторичные электроны, что поддерживает существование плазмы. Высокая скорость распыления достигается увеличением плотности ионного тока за счет сильного магнитного поля [33].

Первые магнетронные распылительные системы (МРС) появились в начале 70-х годов. В то время использовались цилиндрические коаксиальные МРС нормального и инверсного типа. Их главная проблема — неравномерное распыление материала из-за ухода электронов вдоль силовых линий магнитного поля. В связи с этим установки модернизировались [34], технологии развивались, создавались и внедрялись в производство новые типы магнетронов. Назовем некоторые из них:

– магнетрон с плоским катодом;
– магнетрон со сбалансированным магнитным полем;
– магнетрон с несбалансированным магнитным полем;
– несбалансированные магнетроны с вертикальной составляющей магнитного поля к подложке;
– несбалансированные магнетроны с рассеиванием магнитного поля в сторону от подложки;

– несбалансированные МРС с двумя магнетронами;

– магнетроны с устройствами для дополнительной ионизации газа;

– МРС с биполярным питанием.

Схема несбалансированного магнетрона представлена на рис. 3.

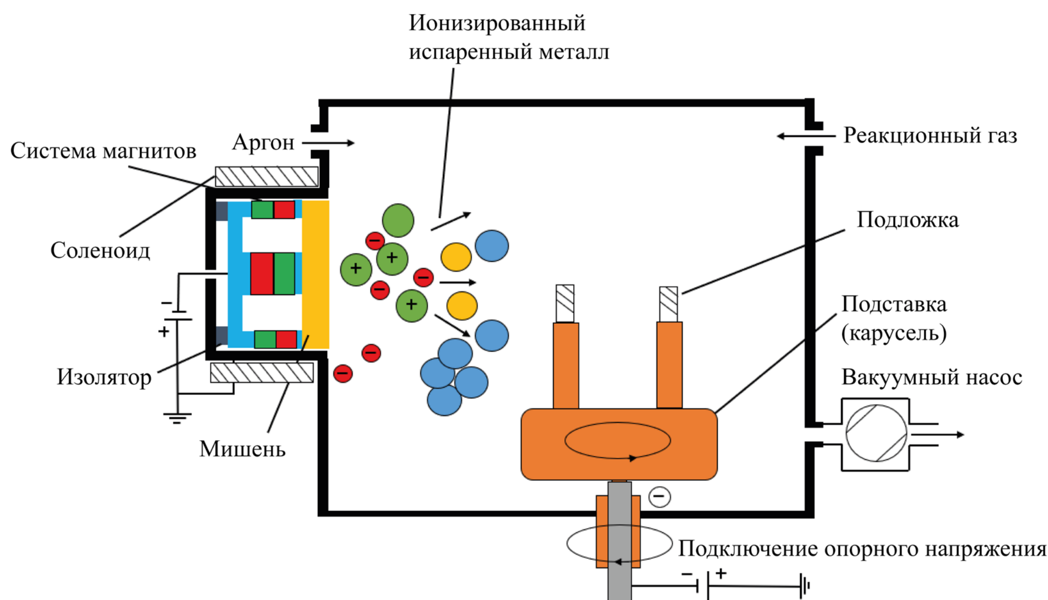


Рис. 3. Схема несбалансированного магнетрона

Основные элементы устройства: катод-мишень, анод и магнитная система. Магнетроны сделаны так, чтобы в приповерхностной области мишени параллельно наводилось магнитное поле. В результате вторичные электроны ускоряются в направлении к мишеням. Один магнитный полюс расположен по центру, а второй — по краям катода. Так обеспечивается захват электронов, которые не бомбардируют саму подложку, тем самым снижая температуру нагрева мишени, а увеличивают степень ионизации плазмы [35].

Основные плюсы данного подхода [36]:

– повторение точного состава мишени в покрытии с высокой плотностью структуры;

– использование любого материала для нанесения на подложку;

– нанесение покрытий при низких температурах;

– управление качеством покрытий с помощью изменения параметров процесса нанесения.

В числе наиболее заметных минусов следует назвать:

– небольшую скорость напыления;

– низкий коэффициент полезного действия;

– слабую адгезию покрытия с подложкой;

– нестабильность фазовых составляющих покрытия;

– стоимость оборудования.

В настоящее время актуально получение покрытий нитридных и высокоэнтропийных покрытий с помощью магнетронного распыления. К ним относятся комбинированные покрытия, высокоэнтропийные (ВЭП), а также:

– металлокерамические (TiN, ZrN, CrN, TiC, TiCN, TiAlN, AlCrN, TiBN, CrAlTiYN, Al2O3, SiO2);

– металлические (Al, Ag, Au, Cu, Zn, Ti, Zr, Hf, Cr, Ta, Ni, Co, Si);

– нанокомпозиты (TiAlN/Si3N4, ZrN/Cu, TiN/CrN, TiN/AlN, CrN/AlN, TiN/CN).

Рассмотрим основные результаты исследований покрытий, полученных магнетронным методом нанесения.

Авторы [37] определили, что магнетронный тип подходит для нанесения покрытия из нитрида титана толщиной от 1 нм до 1 мкм. Для этого задействовали установку с импульсным распылением на кремниевые подложки [38]. Для стабильности процесса варьировали расстояние между мишенью и подложкой в диапазоне 50–100 мм и меняли скорость подачи азота в рабочую камеру. Анализ полученного покрытия нитрида титана (TiN) показал, что при уменьшении расстояния между мишенью и подложкой ухудшаются механические свойства покрытия, снижается его качество. Это объясняется тем, что из-за близкого расстояния усиливается тепловое воздействие, возникает эффект термического отжига.

Авторы [39] изучили скорость роста покрытий на полупроводниковые подложки при комнатной температуре. Варьировались скорость подачи и мощность работы блока управления магнетрона.

Магнетронным методом нанесения получены сверхтвердые покрытия $Ti_{1-x}Al_xN$ при 0,5 > x > 0,6 с микротвердостью 40 ГПа. Стоит отметить, что параметр решетки для TiN уменьшился с 0,4255 нм до 0,417 нм [40].

В покрытии TiMo(SN) чередуются слои дисульфида молибдена MoS_2 с TiN, поэтому микротвердость увеличивается с 4 ГПа до 15–35 ГПа при коэффициенте трения 0,02–0,1. MoS_2 испаряли магнетроном, а TiN — вакуумно-дуговым осаждением. MoS_2Ti с нанотвердостью 10 ГПа и модулем Юнга 142–169 ГПа наносили на покрытие CrN с нанотвердостью 24–30 ГПа и модулем Юнга 352–418 ГПа. Из-за дисульфида молибдена в составе покрытия коэффициент трения снизился на 91–95 %, износ — на 50–95 % [41]. Дисульфид молибдена в чистом виде нанесли с помощью магнетрона и исследовали, не извлекая из камеры. Его коэффициент трения составил 0,002 [42]. Таким образом, добавление в состав покрытий MoS_2 значительно снижает коэффициент трения.

Наноструктурные многослойные покрытия TiN/AlN, полученные магнетронным методом, показали высокие результаты при микросверлении и точении в сравнении с покрытиями TiN. При сверлении стеклопластика стойкость сверл с покрытием TiN/AlN оказалась на 40 % выше, чем без него, и на 25 % выше, чем с покрытием TiN [43].

Важное свойство покрытий, полученных магнетронным методом, — адгезионная прочность. Она позволяет оценить устойчивость поверхности к расслоению. В [44] оценивается адгезионная прочность нитридных покрытий CrN, TiN на углеродистой стали S235. Установлено, что нанесение многослойной структуры (подслой + покрытие) позволяет улучшить адгезию. Так, для покрытия CrN значение адгезионной прочности без подслоя — 37 Н, с подслоем Cr — 40 Н. Показатели для покрытия TiN: 16 Н (без подслоя) и до 24 Н (с подслоем Ti). Адгезионная прочность увеличивается при нанесении покрытий на более твердую основу в виде чистых металлов, близких по составу к основному покрытию.

Авторы [45] изучали адгезионную прочность покрытий AlTiNiAg и NiAg, полученных магнетронным методом. Покрытия наносили на кремниевые структуры и молибденовые термокомпенсаторы силовых полупроводниковых приборов с отжигом в вакууме, водороде и без него. Адгезионную прочность исследовали скретч-тестированием. Максимальную адгезионную прочность выявили у образцов кремниевой структуры с четырехслойным покрытием AlTiNiAg (21,7 Н) после отжига в вакууме. Для молибденовых термокомпенсаторов максимально прочными (13,5 Н) оказались двухслойные покрытия NiAg отожженные в вакууме.

Обзор литературы позволил установить, что для магнетронного распыления характерны:

– возможность работать со многими материалами;

– высокая точность повторения состава мишени (ат. %).

Метод широко применяется для нанесения тонких слоев на полупроводники, стекло и получения самосмазывающихся покрытий с низким коэффициентом трения.

Рост покрытий и механизмы формирования структуры. При нанесении покрытий формирование структуры проходит в несколько этапов (рис. 4). На первом адсорбируются атомы из потока плазмы. Передвижение атома продолжается, пока не сформируется химическая связь с атомами поверхности. На данной стадии атом может не образовать химическую связь с поверхностью подложки, это зависит от наносимого материала и метода нанесения. После закрепления атома на поверхности образуются химические связи с вновь прибывшими атомами — так формируется покрытие. Между подложкой и пленкой могут возникать диффузионные процессы.

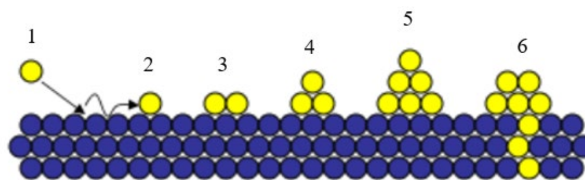


Рис. 4. Схема формирования структуры покрытий:
1 — осаждение атома из потока плазмы; 2 — перемещение атома;
3 — образование адсорбционной химической связи осажденных атомов из плазмы с подложкой;
4, 5 — образование ячеек покрытия; 6 — проникновение атомов плазмы в материал подложки

При адсорбции атома на подложке возникает поверхностное натяжение. Связи между атомами подложки и покрытия удлиняются, поэтому энергия будет зависеть от типа формирования связей. Достижению равновесия энергии способствует сила поверхностной диффузии, которая определяется температурой подложки и энергией атомов.

На рис. 5 схематически изображены три механизма роста покрытий.

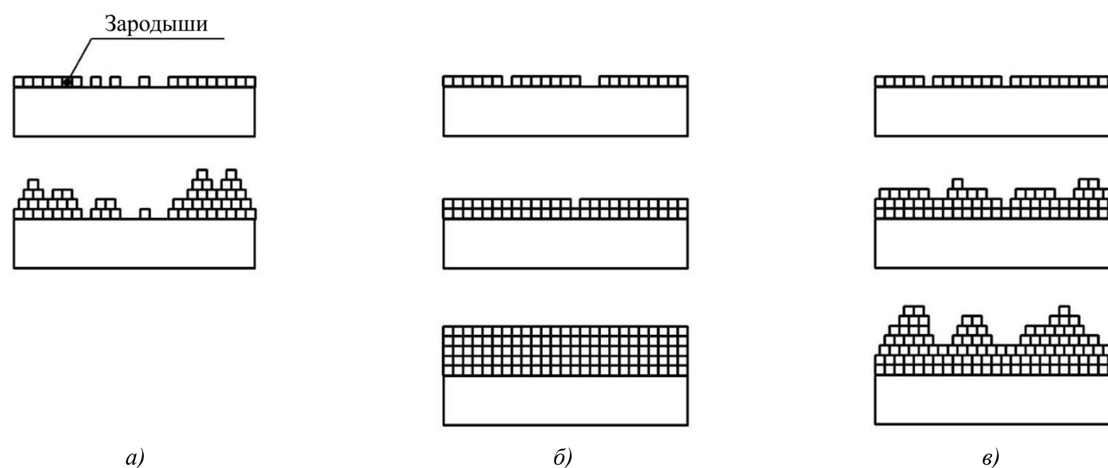


Рис. 5. Схематическое изображение трех механизмов роста покрытий:
а — островковый, Валмера-Вебера; *б* — послойный, ван дер Мерве; *в* — смешанный, Странски — Крастанова

Послойный механизм действует, если сила связи между атомами покрытия меньше, чем сила связи между атомами покрытия и подложки, а также если эти силы равны. В этом случае несоответствие кристаллических решеток должно быть минимальным. Условие реализации островкового механизма: связь между атомами покрытия должна быть сильнее связи атомов покрытия и подложки. Смешанный режим возникает при рассогласовании параметров кристаллической решетки покрытия и подложки [1].

Б.А. Мовчан и А.В. Демчишин [46] — авторы первых значимых работ о механизме роста покрытий. Параллельно они развивали методы физического осаждения и предложили диаграмму зонной структуры покрытий в зависимости от температуры подложек. Исследователи наглядно показали, что микроструктура PVD-покрытий условно делится на три зоны с разной гомологической температурой процесса (T_{hm} — отношение температуры плавления покрытия к температуре подложки $T_{пл}/T_{под}$).

Эту модель усовершенствовал Дж.А. Торнтон [47]. Он внес в диаграмму парциальное давление аргона в камере и промежуточную зону Т (между первой и второй). Плотность покрытия в зоне Т выше, чем в соседних, шероховатость поверхности меньше.

При формировании микроструктуры на разных стадиях [48] образуются зародыши, увеличиваются и коалесцируют островки, появляются поликристаллические островки и каналы, растут пленки (рис. 6).

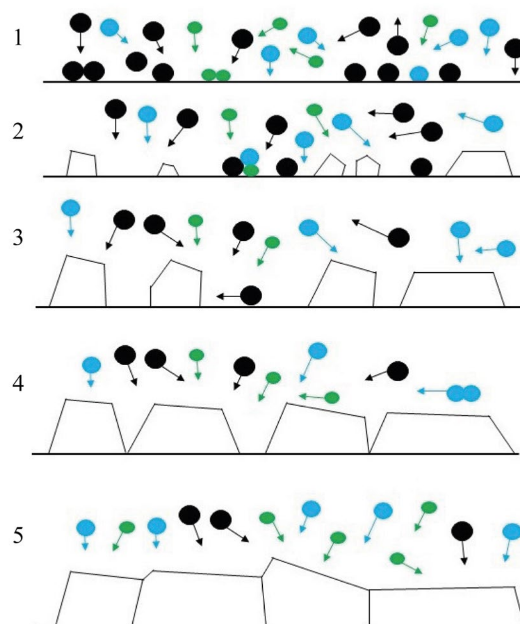


Рис. 6. Схематическая иллюстрация процессов образования структуры:
1 — образование зародышей; 2 — рост островков; 3 — соприкосновения и коалесценция островков; 4 — укрупнение зерен, формирование поликристаллических островков и каналов; 5 — развитие структуры и рост покрытия [48]

Образование зародышей начинается с роста обособленных островков на поверхности подложки. Размер островков — 20–30 Å [49].

В процессе коалесценции островков создается движущая сила укрупнения зерен за счет поверхностной диффузии атомов и движения границ зерен. Образованные островки с низкой энергией поглощают другие. В результате новый монокристаллический островок способствует уменьшению энергии всей поверхности. Укрупнение структуры в процессе коалесценции зависит от температуры, размеров островков и обусловливает их ориентацию [50]. При низких температурах и больших размерах островков укрупнение протекает медленнее из-за зернограничной миграции. В процессе коалесценции кристаллов зерна укрупняются до тех пор, пока их границы не станут большими и неподвижными.

Отметим, что в вакуумных технологиях необходима подготовка подложки для нанесения покрытий. Это важно, потому что при росте покрытий возможно появление таких дефектов, как пористость, внутренние напряжения, деформация кристаллитов и кристаллической решетки. Они возникают и при вакуумно-дуговом методе, и при магнетронном.

Если на поверхности образца есть макронеровности, в покрытии образуются высокие внутренние напряжения, которые приводят к отслоению. Микронеровности обусловливают пористость покрытия и ухудшают его физико-механические свойства. Дефекты появляются на поверхности и увеличиваются с ростом структуры. Образование капельной фазы возможно не только в вакуумно-дуговых покрытиях, но и при магнетронном распылении тугоплавких материалов [50]. Капли на поверхности формируются довольно быстро и стохастично. Результат — винтовые дислокации, которые обусловливают спиральный рост кристаллов. Как показано в [51], в процессе нанесения покрытия «кратеры», образованные из-за отделения крупных частиц, быстро заполняются ионами наносимого материала. Поэтому дефекты из-за капельной фазы — субструктурные и сильно не влияют на структуру и свойства покрытия.

Свойства высокоэнтропийных сплавов. Сравнительно недавно начались исследования ВЭС и покрытий на их основе. В 2002 году профессор Дж.У. Йех (National Tsing Hua University, Национальный университет Цинхуа, Тайвань) разработал новый класс материалов [52]. Физико-механические свойства ВЭС заинтересовали ученых. За 20 лет опубликовано около 5 тыс. работ о ВЭС [53]. Особенность ВЭС — смешивание пяти и более элементов (на каждый приходится 5–35 % ат.). При этом образуется твердый раствор замещения. Он однофазный. Формируется фаза с ОЦК-, ГЦК- или ОЦК+ГЦК-решеткой [54].

Главная особенность ВЭС — высокая энтропия смешивания. Она способствует образованию твердых растворов, что снижает вероятность появления интерметаллидов. Как следствие, для ВЭС характерны: термическая стабильность, коррозионная и износостойкость, повышенная пластичность при низких температурах, устойчивость к ионизирующим излучениям [55]. Для характеристики атомно-кристаллического строения многокомпонентных систем часто используется величина усредненной атомной концентрации (эл./ат.). В высокоэнтропийных сплавах:

– при концентрации до 4 эл./ат. образуется ГПУ-решетка;
– в диапазоне от 4,25 до 7,2 эл./ат. — ОЦК-решетка;
– при концентрации от 7,2 до 8,3 эл./ат. — двухфазная структура с ОЦК- и ГЦК-решетками;
– уровень выше 8,4 эл./ат. соответствует ГЦК-решетке [56].

Свойства ВЭС описывают пятью параметрами [57]:

1) энтропия смешения ΔS_{mix};
2) энтальпия смешения ΔH_{mix};
3) разница атомных размеров δ;
4) электроотрицательная разница $\Delta\chi$;
5) концентрация валентных электронов VEC.

Все критерии рассчитываются с помощью выражений с учетом атомной концентрации каждого i-го компонента сплава c_i.

Энтропия ВЭС состоит из:

– энтропии движения электронов (ΔS_B);
– энтропии колебания атомов (ΔS_v);
– конфигурационной энтропии смешения (ΔS_k);
– энтропии магнитных моментов (ΔS_m) [58].

В высокоэнтропийном сплаве конфигурационная энтропия (ΔS_k) выше, чем у составляющих ΔS_B, ΔS_v, ΔS_m. А для обычных металлов это не характерно. Поэтому в высокоэнтропийных сплавах однофазный твердый раствор образуется благодаря ΔS_k. При увеличении количества элементов (n) растет ΔS_k. Это снижает энергию Гиббса

$\Delta G = \Delta H - T\,\Delta S$ (ΔH — энтальпия; T — абсолютная температура; ΔS — энтропия) и обеспечивает термодинамическую устойчивость [59]. Энтропия и энтальпия высокоэнтропийных сплавов определяются выражениями:

$$\Delta S_{mix} = -R\sum_{i=1}^{n} c_i \cdot ln\left(c_i\right), \tag{2}$$

$$\Delta H_{mix} = \sum 4 c_i c_j \Delta H_{mix}^{AB}, \tag{3}$$

где R — универсальная газовая постоянная, R = 8,314 Дж/(К·моль); c_i — атомная концентрация элемента i (ат. %); ΔH_{mix}^{AB} — энтальпия бинарных сплавов вблизи температуры плавления элементов АВ, входящих в состав ВЭС.

При эквиатомной концентрации компонентов атомная концентрация элемента определяется как $c_i = 1/n$. Значит, уровень энтропии $\Delta S_{mix} = R \cdot \ln(n)$. При $n \geq 5$ конфигурационная энтропия составит: $\Delta S_{mix} \geq$ 13,4 Дж/(К·моль), и сплав будет считается высокоэнтропийным.

На рис. 7 представлена зависимость энтропии смешивания от числа элементов [60].



Рис. 7. Зависимость энтропии смешивания от числа элементов [60]

В металлах и простых сплавах атомы с одинаковой вероятностью могут занять место в кристаллической решетке. Этим они отличаются от ВЭС, в которых из-за замещения нескольких элементов с различными атомными размерами искажается кристаллическая решетка. Если в структуре сплава размеры атомов существенно различаются, то образуются внутренние напряжения, которые и приводят к повышению прочностных свойств покрытий [58].

Искажение кристаллической решетки определяет прочность ВЭС и снижает диффузию. Замедление диффузии усиливает образование и стабилизацию твердого раствора ВЭС, а также уменьшает скорость роста кристаллов. Открывается возможность образования аморфной структуры, однако повышается термическая и химическая стабильность [61].

Для предсказания образования твердых растворов используют разницу атомных радиусов (в %). Этот параметр обозначается δ. Образование структурной фазы в ВЭС определяется:

$$\delta = 100\sqrt{\sum_{i=1}^{n} c_i \left(1 - \frac{r_i}{\bar{r}}\right)^2}, \tag{4}$$

где n — число компонентов в сплаве; c_i — содержание i-го компонента (ат. %); r_i — атомный радиус i-го компонента; $\bar{r}$ — средний атомный радиус $\bar{r} = \sum_{i}^{n} c_i r_i \cdot \bar{r}$.

Для описания разницы атомных размеров в [62] предлагается классифицировать элементы ВЭС. В таблице 1 приведена классификация и элементы в зависимости от атомного размера δ.

Таблица 1

Классификация элементов по атомному размеру [62]

Группа по атомному размеру (радиус)	Элементы группы
Наименьший	Si — 0,117 нм
Малый (около 0,125 нм)	Cr, Co — 0,125 нм, Fe — 0,126 нм, Cu — 0,128 нм, V — 0,132 нм
Средний (около 0,145 нм)	Al — 0,143 нм, Ti — 0,145 нм, Nb — 0,159 нм
Большой (около 0,160 нм)	Hf — 0,159 нм, Zr — 0,160 нм
Очень большой (около 0,180 нм)	Y — 0,180 нм

Для исключения образования фаз Лавеса, интерметаллидов, аморфных фаз предложен теоретический параметр Ω, который учитывает температуру плавления компонентов:

$$\Omega = \frac{T_m \Delta S_{mix}}{\left|\Delta H_{mix}\right|}, \tag{5}$$

где T_m — средняя температура плавления компонентов.

Средняя температура плавления оценивается вместе с разницей атомных радиусов. Высокое значение Ω > 1,1 и небольшое значение δ < 6,6 предсказывает формирование твердых растворов.

Авторы [57] предложили вариант предсказания образования твердых растворов по электроотрицательности:

$$\Delta\chi_{Allen} = \sum_{i=1}^{N} c_i \left(1 - \frac{\chi_i}{\chi_a}\right), \tag{6}$$

где χ_i — электроотрицательность Полинга для *i*-го элемента; χ_a — средняя электроотрицательность.

В данном случае электроотрицательность представляет собой среднюю энергию ионизации валентных электронов свободных атомов. Авторы [63] определили, что в диапазонах 3 < Δχ < 6 и 1 < δ < 6 % формируются твердые растворы. Установлено также, что твердые растворы с ОЦК-решеткой существуют при большем несоответствии атомных радиусов и меньшей электроотрицательности (в сравнении с условиями для ГЦК-решетки).

Концентрация валентных электронов (*VEC*) влияет на стабильность структуры твердых растворов и определяется как средневзвешенная величина:

$$VEC = \sum_{i=1}^{n} c_i \left(VEC\right)_i, \tag{7}$$

где $c_i(VEC)_i$ — *VEC* для *i*-го элемента.

При определении концентрации электронов особое внимание уделяют стабилизации раствора из-за накопления электронов на низкоэнергетических уровнях [59]. Оцениваются плотность структуры и связи на один атом. При *VEC* ≥ 8 формируется одна фаза ГЦК. При 6,87 ≤ *VEC* ≤ 8 фазы ОЦК и ГЦК смешиваются. При *VEC* ≤ 6,87 в сплаве будет только фаза ОЦК. В работе [64] анализируется влияние *VEC* на формирование решетки сплава AlCoCuFeNi. ОЦК-решетка образовывалась при низких значениях концентрации валентных электронов, а ГЦК-решетка — при высоких.

Теоретический анализ позволяет определить условия образования твердого раствора:

– энтальпия смешения — 7 ≤ ΔH_{mix} ≤ 22 кДж/моль;

– энтропия смешения — 11 ≤ ΔS_{mix} ≤ 19,5 Дж/(К·моль);

– разница атомных размеров — 0 ≤ δ ≤ 8,5 %.

Состав высокоэнтропийных сплавов и покрытий. Известны около 40 элементов, из которых можно получить примерно 500 материалов, отвечающих всем критериям высокоэнтропийных сплавов [56].

В литературе элементы ВЭС разделяют на семейства. Наиболее изучено первое — на основе 3d-переходных элементов: Fe, Co, Cr, Ni, Mn, Al, Ti, Cu, V. Это элементы с высокой твердостью, коррозионной и износостойкостью. Один из первых и хорошо изученных ВЭС — CoCrFeMnNi. Это так называемый сплав Кантора, предложенный в 2004 году. Второе семейство ВЭС основано на тугоплавких металлах (Hf, Ta, Mo, Nb, V, W, Cr, Zr, Ti). В третье входят легкоплавкие элементы (Al, Sn, Be, Li, Mg, Ti, Sc, Si, Zn). Четвертое включает редкоземельные элементы (Gd, Dy, Lu, Tm, Tb, Y). Пятое состоит из высокоэнтропийных бронз и латуней (Zn, Cu, Ni, Mn, Al, Sn). Шестое, самое молодое, объединяет Au, Ag, Cu, Co, Cr, Ni, Pt, Pd, Ru, Rh [57]. Некоторые элементы входят в разные семейства.

Для достижения высоких значений твердости и прочности в современных нитридных ВЭС используют переходные *d*-металлы с отрицательной энтальпией (Δ*H*). Состав нитридных ВЭС и их значения твердости приведены в таблице 2.

Таблица 2

Значения твердости высокоэнтропийных сплавов [59]

Состав	Твердость (ГПа)
(AlCrNiSiTi)N	15
(TiVCrZrY)N	18
(AlCrMoSiTi)N	25
(TiAlCrSiV)N	31
(AlCrTaTiZr)N	35
(AlMoNbSiTsTiVZr)N	37
(AlCrNbSiTiV)N	41
(TiHfZrVNb)N	43

Авторы работы [64] установили, что прочностные свойства высокоэнтропийных сплавов выше, чем многих металлических сплавов. Значения предела текучести и твердости по Виккерсу у высокоэнтропийных сплавов высокие — на уровне металлического стекла, титановых и никелевых сплавов. Особое место занимают $NbCrMo_{0,5}Ta_{0,5}TiZr$ и $Al_{2,0}CoCrCuFeNi$. Их твердость по Виккерсу близка к 1 000, а предел упругости превышает этот показатель.

Жаропрочные ВЭС широко используются и могли бы применяться в аэрокосмической промышленности. У первых таких сплавов на основе Mo, Nb, Ta, W, V были серьезные недостатки — высокая плотность и низкая коррозионная стойкость. Проблема решается заменой указанных элементов другими — Cr, Ti, Zr, Al [65].

Важная характеристика теплозащитных сплавов и покрытий — температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР). Он влияет на адгезию между покрытием и подложкой, так как в покрытиях с низким ТКЛР при высокой температуре происходят термические превращения, которые приводят к «шелушению», расслоению и дальнейшему разрушению покрытия:

– диффузионные процессы между покрытием и подложкой;
– фазовые превращения;
– пластические деформации;
– окисления;
– сжимающие напряжения.

Для решения проблемы разрушения покрытий при воздействии температуры в [66] предлагается применить термобарьерный слой из высокоэнтропийного покрытия NiAlCrWTaYSiHf толщиной 20–30 мкм. Это позволяет снизить диффузионный обмен, который обусловливает увеличение ТКЛР и адгезию между комбинируемым покрытием и подложкой. Отметим, что для покрытий трибологического назначения данный критерий не актуален из-за малой толщины покрытий.

Авторы [67] выполнили отжиг двух покрытий:

– $(Al_{23,1}Cr_{30,8}Nb_{7,7}Si_{7,7}Ti_{30,7})_{50}N_{50}$ при потенциале смещения (–100) В;
– $(Al_{29,1}Cr_{30,8}Nb_{11,2}Si_{7,7}Ti_{21,2})_{50}N_{50}$ при потенциале смещения (–150) В.

Отжиг проводили при температуре 900 °С в течение двух часов. Изучение микроструктуры показало, что на поверхности покрытия образуются частицы оксида. Их толщина для покрытия $(Al_{23,1}Cr_{30,8}Nb_{7,7}Si_{7,7}Ti_{30,7})_{50}N_{50}$ — 100 ± 12 нм, для покрытия $(Al_{29,1}Cr_{30,8}Nb_{11,2}Si_{7,7}Ti_{21,2})_{50}N_{50}$ — 80 ± 7 нм. Под оксидными пленками структура покрытия не меняется. Исследование подтвердило, что высокоэнтропийные покрытия обладают высокой стойкостью к окислению и по этому показателю превосходят большинство эксплуатируемых покрытий.

Для получения выскоэнтропийных покрытий широко применяются PVD-методы осаждения: вакуумно-дуговой и магнетронный. Подробно изучены свойства нескольких типов покрытий из высокоэнтропийных сплавов: (AlCrTaTiZr)N, (TiAlCrNbY)C, (FeCoNiCrCuAl)N, (AlCrMoSiTi)N, (AlCrNbSiTiV)N, (TiAlCrSiV)N, (AlMoNbSiTaTiVZr)N, (TiVCrZrY)N, (TiHfZrVNb)N, (TiVCrZrHf)N.

Авторы [68] получили высокоэнтропийные нитридные покрытия с помощью вакуумно-дугового осаждения и магнетронного напыления. Выяснилось, что металлы IV–V групп склонны к образованию нитридов со стабильной структурой. Микроструктура и твердость высокоэнтропийных нитридных покрытий зависят от параметров процесса осаждения. В процессах с одинаковыми параметрами увеличение количества компонентов ведет к увеличению твердости покрытий. Улучшенные трибологические свойства достигнуты путем добавления элементов Mo или W, которые снижают коэффициенты трения. Добавление Al и Si повышает стойкость к окислению за счет образования защитных оксидных слоев.

В [69] показано получение пленки CoCrFeNi толщиной около 1 мкм с помощью ионно-лучевого распыления. Пленку аналогичного состава и толщины получили также методом кручения под высоким давлением (англ. high pressure torsion, HPT). При сравнительном анализе пленок текстуры и размеры кристаллитов определили методом рентгеновской дифракции, твердость измерялась методом наноиндентирования. Твердость пленки, полученной методом PVD — 9,8 ± 0,3 ГПа. Это больше, чем у образца HPT (7,3 ± 0,3 ГПа). Размер зерна кристаллитов — около 20 нм.

Авторы [70] при магнетронном напылении получили покрытие CuTiZrCrNi на подложке из стали AISI 201 (12Х15Г9НД). Установлено, что после трибологических испытаний износ покрытия — $3 \cdot 10^{-4}$ г/мин. Коэффициент трения покрытия CuTiZrCrNi по меди — 0,041, по алюминию — 0,066.

В [71] описано покрытие CrTiNiZrCu на подложке из стали AISI 201 (12Х15Г9НД), полученное с помощью магнетронного распыления. Атомно-силовая микроскопия показала ячеистую наноструктуру высокоэнтропийного покрытия. Описаны несколько моделей ее образования, установлены основные причины формирования таких наноструктур.

Авторы [72] задействовали магнетрон для формирования покрытия CrNbTiMoZr с нанотвердостью 9,7 ГПа и высокими трибологическими свойствами. В [73] рассматриваются многокомпонентные покрытия на основе AlCrTiV с добавлением Cu и Mo. Исследователи пришли к выводу, что коррозионные свойства покрытий значительно превосходят свойства подложки из стали AISI 304 (08Х18Н10). Это объясняется образованием стабильных оксидов.

В [74] описано создание покрытия TiTaHfNbZr с толщиной 800 нм на подложке из сплава Ti-6Al-4V. Его получили с помощью магнетронного распыления. Трибологическое исследование показало, что при увеличении нагрузки с 1 Н до 3 Н износ подложки без покрытия существенно возрастает, тогда как для образцов с покрытием TiTaHfNbZr износ незначительный.

В рамках исследования [75] вакуумно-дуговым и магнетронным методами получили покрытие (TiAlSiCrNiCuOC)N с решеткой типа B1, как у TiN, со сверхтвердостью 47 ГПа и термической стабильностью 900–1 000 °С.

В [76] показано получение нитридного высокоэнтропийного покрытия (TiZrHfVNb)N с помощью вакуумно-дугового метода. Опорное напряжение изменилось с –40 до (–200) В. Толщина покрытия составила 4,78 мкм. Результаты наноиндентирования показали, что при росте опорного напряжения увеличиваются:

– микротвердость (с 19,34 ГПа до 29,94 ГПа);

– модуль упругости (с 281 ГПа до 384,1 ГПа).

Трибологические испытания позволили установить коэффициент трения (1,193). Покрытие имело низкий износ 0,039 $I \cdot 10^{-5}$ (мм^3/Н/мм).

Несколько работ посвящены изучению структурно-фазового состояния и физико-механических свойств высокоэнтропийных покрытий. Основные результаты исследований представлены в таблице 3.

Таблица 3

Результаты исследований структурно-фазового состояния и физико-механических свойств ВЭП

Наименование покрытия	Технологические параметры	Твердость *H*, ГПа	Модуль Юнга, ГПа	Структура	Ссылка
$(Al_{23,1}Cr_{30,8}Nb_{7,7}Si_{7,7}Ti_{30,7})_{50}N_{50}$	U_c = –50 В	16,00	305	ГЦК	[77]
	U_c = –100 В	36,10	440		
	U_c = –150 В	34,10	400		
$(Al_{29,1}Cr_{30,8}Nb_{11,2}Si_{7,7}Ti_{21,2})_{50}N_{50}$	U_c = –50 В	25,00	330	ГЦК	[77]
	U_c = –100 В	35,00	390		
	U_c = –150 В	37,00	395		
(AlCrTaTiZr)N	–	34,00–35,00	340–355	ГЦК	[78]
(AlCrMoTaTiZr)N	N = 40 %	40,20	370	ГЦК	[79]
	N = 50 %	37,00	420		
$(AlCrMnMoNiZrB_{0,1})N$	R_N=N_2/Ar = 0	7,10	163	Аморфная	[80]
	R_N=N_2/Ar = 0,5	~10,00	~180	ГЦК	
	R_N=N_2/Ar = 1	10,20	~180	ГЦК	
(TiZrNbHfTa)N	U_c = –50 В	22,50	170	ГЦК	[81]
	U_c = –100 В	33,00	276		
	U_c = –150 В	32,90	268		
(TiZrNbHfTa)N	U_c = –50 В	22,50	170	ГЦК	[81]
	U_c = –100 В	33,00	276		
	U_c = –150 В	32,90	268		
(TiZrNbHfTa)C	–	27,50	–	ГЦК	[81]
TiZrNbHfTa		5,40	–	ГЦК + двойные (тройные) связи	[81]
(TiVCrZrHf)N	$T_{подложки}$ = 250 °С	41,00	~300	ГЦК	[82]
	$T_{подложки}$ = 350 °С	45,00	~310		
	$T_{подложки}$ = 450 °С	49,00	~320		
	$T_{отжига}$ = 300 °С	31,24	300		[83]
	$T_{отжига}$ = 500 °С	11,85	250		
	$T_{отжига}$ = 700 °С	2,30	~60		
(TiHfZrVNb)N	U_c = –50 В	21,00	337	ГЦК	[59]
	U_c = –100 В	28,70	361		
	U_c = –200 В	29,50	373		
(TiVCrZrY)N	N = 0 %	20,90	–	ГПУ	[84]
	N = 100 %	18,90	–		

Данные таблицы 3 позволяют сделать вывод, что для получения высокопрочных покрытий нужно вводить в их состав переходные металлы. Добавление азота увеличивает ковалентные связи в покрытии и значительно повышает твердость. Покрытия на основе ВЭС — многопараметрические, поэтому для изменения значений нанотвердости и модуля Юнга следует при нанесении варьировать технологические параметры: подачу азота, температуру подложки, опорное напряжение.

Исследования высокоэнтропийных покрытий основаны на изучении структуры покрытия, физико-механических свойств, термической устойчивости. Меньше внимания уделено трибологическим исследованиям. В таблице 4 обобщены их основные известные результаты.

Таблица 4

Результаты трибологических исследований высокоэнтропийных покрытий

Наименование покрытия	Коэффициент трения	Интенсивность изнашивания $I \cdot 10^{-6}$ (мм^3/Н/м)	Ссылка
(AlCrTaTiZr)N	0,760	3,66	[85]
(AlCrMoTaTiZr)N	0,800	2,90	[86]
(TiZrNbHfTa)N	0,960	2,90 ± 0,20	[81]
(TiZrNbHfTa)C	0,150	0,80 ± 0,05	[81]
TiZrNbHfTa	0,870	17,00 ± 1,00	[81]
(TiZrHfVNb)N	1,193	390,00	[59]

Из таблицы 4 видно, что высокоэнтропийные покрытия имеют высокий коэффициент трения. Отметим, что у (TiZrNbHfTa)C данный коэффициент крайне низкий (0,15). Это объясняется образованием фазы свободного углерода, которая действует как твердая смазка и снижает коэффициент трения. Высокая износостойкость ВЭП связана с повышением твердости при легировании переходных металлов, азота и большей устойчивостью к пластической деформации.

Методы исследования высокоэнтропийных покрытий. Микроструктура ВЭП рассматривается с помощью оптической металлографии. Для изучения тонких деталей задействуют растровую электронную микроскопию (РЭМ, англ. SEM). Ее основные преимущества — высокое разрешение и наглядность. К тому же РЭМ работает с несколькими видами индуцированного излучения. Кроме рентгеновского задействуются излучения отраженных и поглощенных электронов, а также катодолюминесценция. Благодаря этому можно исследовать рельеф поверхности, фазовый и ориентационный контрасты, провести микрорентгеноспектральный и энергодисперсионный анализ. В некоторых случаях сочетаются возможности электронной микроскопии и кросс-секционного исследования.

Химический состав покрытий определяет энергодисперсионный рентгеновский детектор. Он позволяет точечно зондировать или сканировать участок по площади фигуры или по карте распределения химических элементов. Для повышения точности определения элементного и фазового состава покрытий используют методы рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии и оже-электронной спектроскопии. С поверхности покрытий записываются обзорные спектры. По ним исследуется качественный и количественный состав поверхности. Кроме того, по спектрам определяются электронные линии химических элементов поверхности, благодаря которым возможно эффективное определение химической связи. Это позволяет судить о фазе, в которую входит элемент.

Для определения кристаллической структуры высокоэнтропийных покрытий используют рентгеноструктурный анализ. С этой целью на рентгенограмме выделяют рефлексы с максимальной интенсивностью. По ним делают выводы о фазовом составе, размере областей когерентного рассеяния, параметрах кристаллической решетки и деформации кристаллической решетки покрытия [87].

Такие физико-механические характеристики покрытия, как твердость (H) и модуль упругости (E) измеряются наноиндентированием. В этом случае кривые нагрузок анализируются с помощью метода Оливера и Фарра [88]. Для индентирования в режиме непрерывного измерения используют алмазный индентор Берковича. Кроме твердости и модуля упругости можно определить:

– отношение H/E, т. е. сопротивление упругой деформации (способность материала менять свою форму и размер при деформации);

– H^3/E^2, т. е. сопротивление пластической деформации.

H/E — это показатель трибологических свойств. Чем он больше, тем выше износостойкость. Материалы с $H/E < 0{,}04$ относятся к крупнокристаллической группе (металлы и сплавы), а материалы с $H/E \approx 0{,}05 – 0{,}09$ — к группе мелкокристаллических и наноматериалов (керамика, покрытия).

Трибологические свойства покрытий определяются с помощью машин трения по схеме «шар — диск» или «штифт — пластина». По результатам испытаний оцениваются такие характеристики покрытий, как износ и коэффициент трения.

Обсуждение и заключение. Анализ литературы, выполненный авторами представленной статьи, дает возможность:

– рассмотреть широко используемые методы нанесения PVD-покрытий;

– понять принцип создания катодных пятен с помощью взрывной эмиссии электронов в вакуумно-дуговом методе;

– отследить влияние тока разряда в процессе формирования катодных пятен на катоде;

– оценить важность процессов, происходящих на аноде и подложке.

Одно из преимуществ покрытий, полученных вакуумно-дуговым и магнетронным методами, — широкий выбор материалов для синтезирования покрытий с высокими физико-механическими и трибологическими характеристиками.

Выделены три класса роста формирования покрытий. Определена суть процесса. Это зародышеобразование с ростом островков размером 20–30 Å. Подчеркнем, что у любого покрытия возможны дефекты: пористость, внутренние напряжения, деформация кристаллитов и кристаллической решетки.

Высокоэнтропийные сплавы формируются при смешении пяти и более элементов. Высокая энтропия способствует формированию твердых растворов. Данная особенность обусловливает термическую стабильность, износостойкость, повышенную пластичность при низких температурах, коррозионную стойкость, устойчивость к ионизирующим излучениям. Известны около 40 элементов, которые входят в высокоэнтропийные сплавы, поэтому для точного подбора материала, прогнозирования стабильности и структурно-фазового состояния ВЭС разработаны специальные критерии (параметры):

– разница атомных размеров компонентов δ;

– энтальпия смешения ΔH_{mix};

– энтропия смешения ΔS_{mix};

– разница электроотрицательностей компонентов $\Delta\chi$;

– концентрация валентных электронов VEC.

В рамках данной научной работы установлено, что в литературе достаточно проработаны вопросы, связанные с нитридными покрытиями, полученными вакуумно-дуговым и магнетронным методом. Есть фундаментальные исследования структуры покрытий, их физико-механических свойств, термической устойчивости. Известно также, что высокоэнтропийные покрытия выделяются высокой твердостью с гранецентрированной кубической решеткой, высокой термической стабильностью. В составах рассматриваемых покрытий широко используют переходные металлы с добавлением азота. Основной вид высокоэнтропийных покрытий — нитридные. Для покрытий, изученных в рамках представленной работы, характерен значительный коэффициент трения. Однако благодаря твердости и пластичности они демонстрируют высокую износостойкость.

Сложно утверждать, что в машиностроении высокоэнтропийные покрытия уже могут заменить традиционные. Однако со временем их масштабно задействуют для элементов, которые функционируют в условиях высоких температур.

По итогам анализа литературы следует отметить ограниченное число работ, рассматривающих данную проблематику с точки зрения трибологии. Для дальнейших исследований необходимо разрабатывать высокоэнтропийные покрытия, которые обеспечат высокую твердость, износостойкость и низкий коэффициент трения. Это позволит создавать покрытия, пригодные для эксплуатации в трибонагруженных узлах, а значит, в машиностроительных производственных процессах. Таким образом, ожидается получение перспективных материалов, которые составят конкуренцию традиционным покрытиям.

Список литературы / References

1. Политыко К.Н., Мантуров Д.С. Формирование PVD-покрытий для трибологического назначения. *Труды Ростовского государственного университета путей сообщения.* 2023;64(3):81–93.

Polityko KN, Manturov DS. Formation of PVD Coatings for Tribological Purposes. *Trudy RGUPS – Transaction of RSTU.* 2023;64(3):81–93.

2. Андреев А.А. *Вакуумно-дуговые покрытия*. Харьков: ННЦ ХФТИ; 2010. 318 с.

Andreev AA. *Vacuum-Arc Coatings.* Kharkov: NSC KIPT; 2010. 318 p. (In Russ.)

3. Anders A. *Cathodic Arcs.* New York: Springer; 2008. 540 p. https://doi.org/10.1007/978-0-387-79108-1

4. Boxman RL. Early History of Vacuum-Arc Deposition. *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2001;29(5):759–761. https://doi.org/10.1109/27.964470

5. Mattox DM. *The History of Vacuum Coating Technology.* Albuquerque, NM: Management Plus Inc.; 2002. 51 p. URL: http://www.astrosurf.com/astroptics/files/histoire_des_couches_anti-reflet.pdf (accessed: 03.09.2024).

6. Аксенов И.И., Андреев А.А. Вакуумно-дуговые ионно-плазменные технологии покрытий в ХФТИ. *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники».* 1998;2(3)/3(4):3–10.

Aksenov II, Andreev AA. Vacuum-Arc Ion-Plasma Coating Technologies in KIPT. *Problems of Atomic Science and Technology. Series "Vacuum, Pure Materials, Superconductors".* 1998;2(3)/3(4):3–11. (In Russ.)

7. Зимин А.М., Иванов В.А., Юттнер Б. Динамика катодных пятен на поверхности бериллия в дуговом вакуумном разряде. *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Термоядерный синтез»*. 2001;(2):44–50.

Zimin AM, Ivanov VA, Juttner B. Dynamics of Cathode Spots on the Beryllium Surface in Vacuum Arc Discharge. *Problems of Atomic Science and Technology. Series "Thermonuclear Fusion"*. 2001;(2):44–50.

8. Месяц Г.А. *Эктоны в вакуумном разряде: пробой, искра, дуга*. Москва: Наука; 2000. 424 с.

Mesyats GA. *Ectons in a Vacuum Discharge: Breakdown, Spark, Arc.* Moscow: Nauka; 2000. 424 p. (In Russ.)

9. Кобайн Дж., Эккер Г., Фаррелл Дж., Гринвуд А., Харрис Л. *Вакуумные дуги. Теория и приложения*. Москва: Мир; 1982. 432 с.

Cobine J, Ecker G, Farrall J, Greenwood A, Harris L. *Vacuum Arcs: Theory and Application*. Moscow: Mir; 1982. 432 p. (In Russ.)

10. Лунев В.М., Овчаренко В.Д., Хороших В.М. Исследование некоторых характеристик плазмы вакуумной металлической дуги. *Журнал технической физики.* 1977;47(7):1486–1490.

Lunev VM, Ovcharenko VD, Khoroshikh VM. Investigation of Some Characteristics of Vacuum Metal Arc Plasma. *Technical Physics*. 1977;47(7):1486–1490. (In Russ.)

11. Забелло К.К., Логачев А.А., Чалый А.М., Школьник С.М. Характеристики статистического распределения тока, пропускаемого катодным пятном вакуумной дуги, в магнитных полях различной ориентации. *Журнал технической физики*. 2009;79(6):58–66.

Zabello KK, Logatchev AA, Chaly AM, Shkolnik SM. Characteristics of the Statistical Distribution of the Current Transmitted by the Cathode Spot of a Vacuum Arc in Variously Oriented Magnetic Fields. *Technical Physics*. 2009;79(6):58–66.

12. Фортов В.Е., Александров А.Ф., Асиновский Э.И., Грибков В.А., Диденко А.Н., Дыхне А.М. и др. *Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Вводный том 1*. Москва: Наука; 2000. 634 с.

Fortov VE, Alexandrov AF, Asinovsky EI, Gribkov VA, Didenko AN, Dykhne AM, et al. *Encyclopedia of Low Temperature Plasma. Introductory Volume 1.* Moscow: Nauka; 2000. 634 p. (In Russ.)

13. Juttner B, Puchkarev VF, Hantzsche E, Beilis I. Cathode Spots. In book: Boxman RL, Sanders DM, Martin PJ. (eds) *Handbook of Vacuum Arc Science and Technology.* Park Ridge: Noyes Publications; 1995. P. 73–281.

14. Райзер Ю.П. *Физика газового разряда.* Москва: Наука; 1987. 592 с.

Raizer YuP. *Physics of Gas Discharge.* Moscow: Nauka; 1987. 592 p. (In Russ.)

15. Mattox MD. *Handbook of Physical Vapor Deposition* (*PVD*) *Processing*. Norwich, NY: William Andrew Publ.; 2010. 746 p.

16. Цвентух М.М., Баренгольц С.А., Месяц В.Г., Шмелев Д.Л. Обратное движение катодных пятен первого типа в тангенциальном магнитном поле. *Письма в журнал технической физики.* 2013;39(21):1–9. URL: https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/14640 (дата обращения: 03.09.2024).

Tsventukh MM, Barengolts SA, Mesyats VG, Shmelev DL. Reverse Motion of Cathode Spots of the First Type in a Tangential Magnetic Field. *Technical Physics Letters.* 2013;39(21):1–9. (In Russ.) URL: https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/14640 (accessed: 03.09.2024).

17. Fang DY, Nürnberg A, Bauder UH, Behrisch R. Arc Velocity and Erosion for Stainless Steel and Aluminum Cathodes. *Journal of Nuclear Materials*.1982;111-112:517–521. https://doi.org/10.1016/0022-3115(82)90258-6

18. Грановский В.Л. *Электрический ток в газах. Установившийся ток*. Москва: Наука; 1971. 543 с.

Granovsky VL. *Electric Current in Gases. Steady State Current.* Moscow: Nauka; 1971. 543 p. (In Russ.)

19. Nürnberg AW, Fang DY, Bauder UH, Behrisch R, Brossa F. Temperature Dependence of the Erosion of A1 and TiC by Vacuum Arcs in a Magnetic Field. *Journal of Nuclear Materials.*1981;103:305–308. https://doi.org/10.1016/0022-3115(82)90614-6

20. Аксенов И.И., Коновалов И.И., Падалка В.Г., Хороших В.М., Брень В.Г. *Исследование эрозии катода стационарной вакуумной дуги*. Москва: ЦНИИатоминформ; 1984. 23 с.

Aksenov II, Konovalov II, Padalka VG, Khoroshikh VM, Bren VG. *Investigation of Cathode Erosion of a Stationary Vacuum Arc*. Moscow: Atominform; 1984. 23 p. (In Russ.)

21. Borisov DP, Goncharenko IM, Koval NN, Schani PM. Plasma-Assisted Deposition of a Three-Layer Structure by Vacuum and Gas Arcs. IEEE Transactions on Plasma Science. 1998;26(6):1680–1684. https://doi.org/10.1109/27.747886

22. Аксенов И.И., Андреев А.А., Брень В.Г., Гаврилко И.В., Кудрявцева Е.Е., Кунченко В.В. и др. Покрытия, полученные конденсацией плазменных потоков в вакууме (способ конденсации с ионной бомбардировкой). *Украинский физический журнал*. 1979;24(4):515–525.

Aksenov II, Andreev AA, Bren VG, Gavrilko IV, Kudryavtseva EE, Kunchenko VV, et al. Coatings Obtained by Condensation of Plasma Streams in Vacuum (Ion Bombardment Condensation Method). *Ukrainian Journal of Physics*. 1979;24(4):515–525. (In Russ.)

23. Будилов В.В., Шехтман С.Р., Измайлова Н.Ф. Осаждение вакуумных ионно-плазменных покрытий на лопатки турбины ГТД с использованием разряда на основе эффекта полого катода. *Известия высших учебных заведений. Авиационная техника.* 2001;(1):76–77.

Budilov VV, Shekhtman SR, Izmailova NF. Deposition of Vacuum Ion-Plasma Coatings on Turbine Blades of a Gas Turbine Engine with the Use of Discharge and the Hollow Cathode Effect. *Russian Aeronautics.* 2001;(1):76–78.

24. Кунченко В.В., Андреев А.А. Карбонитриды титана, полученные вакуумно-дуговым осаждением. *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение».* 2001;(2):116–120.

Kunchenko VV, Andreev AA. Titanium Carbonitrides Obtained by Vacuum Arc Deposition. *Problems of Atomic Science and Technology. Series "Physics of Radiation Damage and Radiation Materials Science".* 2001;(2):116–120. (In Russ.)

25. Roos JR, Selis JP, Vancoille E, Veltrop H, Boelens S, Jungblut F, et al. Interrelationship between Processing, Coating Properties and Functional Properties of Steered Arc Physically Vapour Deposited (TiAl)N and (TiNb)N Coatings. *Thin Solid Films.* 1990;193–194(1):547–556. https://doi.org/10.1016/S0040-6090(05)80064-1

26. Da-Yung Wang, Yen-Way Li, Chi-Long Chang, Wei-Yu Ho. Deposition of High Quality (Ti,Al)N Hard Coatings by Vacuum Arc Evaporation Process. *Surface and Coatings Technology*. 1999;114(2–3):109–113. https://doi.org/10.1016/S0257-8972(99)00020-1

27. Goller R, Torri P, Baker MA, Gilmore R, Gissler W. The Deposition of Low-Friction TiN-MoS_x Hard Coatings by a Combined Arc Evaporation and Magnetron Sputter Process. *Surface and Coatings Technology*. 1999;120–121:453–457. https://doi.org/10.1016/S0257-8972(99)00466-1

28. Кирюханцев-Корнеев Ф.В., Штанский Д.В., Шевейко А.Н., Левашов Е.А., Лясоцкий И.В., Дьяконова Н.Б. Структура и свойства Ti-Si-N покрытий, полученных магнетронным распылением СВС-мишеней. *Физика металлов и металловедение.* 2004;97(3):314–321.

Kiryukhantsev-Korneev FV, Shtanskii DV, Sheveiko AN, Levashov EA, Lyasotskii IV, Dyakonova NB. Structure and Properties of Ti-Si-N Coatings Produced by Magnetron Sputtering of SHS Targets. *Physics of Metals and Metallography.* 2004;97(3):314–321.

29. PalDey S, Deevi SC. Single Layer and Multilayer Wear Resistant Coatings of (Ti,Al)N: A Review. *Materials Science and Engineering: A*. 2003;342(1–2):58–79. https://doi.org/10.1016/S0921-5093(02)00259-9

30. Xiaolu Pang, Huisheng Yang, Kewei Gao, Yanbin Wang, Alex A Volinsky. AlTiN Layer Effect on Mechanical Properties of Ti-Doped Diamond-like Carbon Composite Coatings. *Thin Solid Films*. 2011;519(16):5353–5357. https://doi.org/10.1016/j.tsf.2011.02.040

31. Солодухин И.А., Ходасевич В.В., Углов В.В., Приходько Ж.Л. Изменение адгезии и трибологических свойств покрытий TiN и Ti при осаждении их на подложки, подвергнутые ионной имплантации. В: *Труды IV междунар. конф. «Взаимодействие излучений с твердым телом».* Минск: БГУ; 2001. С. 294–296.

Solodukhin IA, Khodasevich VV, Uglov VV, Prikhodko ZhL. The Change of Adhesion and Tribological Properties of TiN and Ti Coatings in the Case of Their Deposition on Substrates Subjected to Ion Implantation. In: *Proc. IV International Scientific Conference "Interaction of Radiation with Solids".* Minsk: BSU; 2001. P. 294-296. (In Russ.)

32. Анищик В.М., Кулешов А.К., Углов В.В., Русальский Д.П., Сыщенко А.Ф. Определение адгезионной прочности Mo-Ti-N и Mo-Cu-N покрытий на установке «скретч-тестер». *Приборы и методы измерений.* 2015;1(10):81–86. URL: https://rep.bntu.by/handle/data/18005?ysclid=m0ns044q9y49469251 (дата обращения: 03.02.2024).

Anischik VM, Kuleshov AK, Uglov VV, Rusalsky DP, Syshchenko AF. Measurement of Adhesion Strength of Mo-Ti-N and Mo-Cu-N Coatings Using "Scratch-Tester" Device. *Devices and Methods of Measurements.* 2015;1(10):81–86. URL: https://rep.bntu.by/handle/data/18005?ysclid=m0ns044q9y49469251 (accessed: 03.02.2024).

33. Филатов М.С., Стогней О.В. Получение композитов Ni-ZrO_2 с разной концентрацией металлической фазы методом магнетронного ВЧ реактивного напыления. В: *Труды 13 Междунар. конф. «Пленки и покрытия — 2017».* Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого; 2017. С. 106–109.

Filatov MS, Stognei OV. Preparation of Ni-ZrO2 Composites with Different Concentrations of the Metal Phase by RF Magnetron Sputtering. In: *Proc. 13th International Conference "Films and Coatings".* St. Petersburg: Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University; 2017. P. 106–109. (In Russ.)

34. Yeom GY, Thornton JA, Penfold AS. Magnetic Field Designs for Cylindrical-Post Magnetron Discharge Sources. *Journal of Vacuum Science and Technology A*. 1988;6(6):3156–3158. https://doi.org/10.1116/1.575048

35. Larhlimi H, Ghailane A, Makha M. Magnetron Sputtered Titanium Carbide-Based Coatings: A Review of Science and Technology. *Vacuum.* 2022;197:110853. http://doi.org/10.1016/j.vacuum.2021.110853

36. Локтев Д., Ямашин Е. Методы и оборудование для нанесения износостойких покрытий. *Наноиндустрия*. 2007;(4):18–25.

Loktev D, Yamashin E. Methods and Equipment for Applying Wear-Resistant Coatings. *Nanoindustry*. 2007;(4):18–24.

37. Юрьев Ю.Н., Михневич К.С., Кривобоков В.П., Сиделев Д.В., Киселева Д.В., Новиков В.А. Свойства пленок нитрида титана, полученных методом магнетронного распыления. *Известия Самарского научного центра РАН*. 2014;16(4):672–676.

Yuryev YuN, Mikhnevich KS, Krivobokov VP, Sidelyov DV, Kiselyova DV, Novikov VA. Properties of Titanium Nitride Films Obtained by Magnetron Sputtering. *Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2014;16(4):672–676.

38. Yurjev YuN, Sidelev DV. Technological Peculiarities of Deposition Anti-Reflective Layers in Low-E Coatings. *Journal of Physics: Conference Series*. 2013;479(1):1–4. http://doi.org/10.1088/1742-6596/479/1/012018

39. Ерофеев Е.В., Федин И.В., Казимиров А.И. Исследование электрофизических параметров тонких пленок нитрида титана, полученных методом магнетронного распыления. *Вестник СИБГУТИ*. 2015;31(3):29–34. URL: https://vestnik.sibsutis.ru/jour/article/view/506 (дата обращения: 03.09.2024).

Yerofeev EV, Fedin IV, Kazimirov AI. Investigation of the Electrical Properties of Tin Thin Films Obtained by Magnetron Sputtering. *Herald of the Siberian State University of Telecommunications and Information Science*. 2015;31(3):29–34. https://vestnik.sibsutis.ru/jour/article/view/506 (accessed: 03.02.2024).

40. Tanaka Y, Gur TM, Kelly M, Hagstrom SB, Ikeda T, Wakihira K, et al. Properties of $(Ti_{1-x}Al_x)N$ Coatings for Cutting Tools Prepared by the Cathodic Arc Ion Plating Method. *Journal of Vacuum Science and Technology A*. 1992;10(4):1749–1756. http://doi.org/10.1116/1.577742

41. Carrera S, Salas O, Moore JJ, Woolverton A, Sutter E. Performance of $CrN/MoS_2(Ti)$ Coatings for High Wear Low Friction Applications. *Surface and Coatings Technology*. 2003;167(1):25–32. http://doi.org/10.1016/S0257-8972(02)00885-X

42. Donnet C, Le Mogne Th, Martin JM. Superlow Friction of Oxygen-Free MoS_2 Coatings in Ultrahigh Vacuum. *Surface and Coatings Technology*. 1993;62(1–3):406–411. http://doi.org/10.1016/0257-8972(93)90275-S

43. Polcar T, Kubart T, Novák R, Kopecký L, Široký P. Comparison of Tribological Behaviour of TiN, TiCN and CrN at Elevated Temperatures. *Surface and Coatings Technology*. 2005;193(1–3):192–199. http://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.07.098

44. Horník J, Krum S, Tondl D, Puchnin M, Sachr P, Cvrček L. Multilayer Coatings Ti/TiN, Cr/CrN and W/WN Deposited by Magnetron Sputtering for Improvement of Adhesion to Base Materials. *Acta Polytechnica.* 2015;55(6):388–392. 10.14311/AP.2015.55.0388

45. Нищев К.Н., Мартыненко В.А., Беглов В.И., Гришанин А.В., Елисеев В.В., Малыгин М.Ю. и др. Исследования свойств многослойной металлизации структур «кремний на молибдене», полученной методом магнетронного распыления. *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки.* 2013;27(3):248–260.

Nishchev KN, Martynenko VA, Beglov VI, Grishanin AV, Eliseev VV, Malygin MYu, et al. Research of the Properties of Multilayer Metallization of the Structures “Silicon on Molybdenum” obtained by Magnetron Sputtering. *University Proceedings. Volga Region. Physical and Mathematical Sciences.* 2013;27(3):248–260.

46. Movchan BA, Demchishin AV. Structure and Properties of Thick Condensates of Nickel, Titanium, Tungsten, Aluminum Oxides, and Zirconium Dioxide in Vacuum. *Physics of Metals and Metallography*. 1969;28:653–660.

47. Thornton JA. Influence of Apparatus Geometry and Deposition Condition on the Structure and Topography of Thick Sputtered Coatings. *Journal of Vacuum Science and Technology*. 1974;11:666–670. http://doi.org/10.1116/1.1312732

48. Barna PB, Adamik M. Fundamental Structure Forming Phenomena of Polycrystalline Films and the Structure Zone Models. *Thin Solid Films*.1998;317(1/2):27–33. http://doi.org/10.1016/S0040-6090(97)00503-8

49. Petrov I, Hultman L, Barna P, Greene JE. Microstructural Evolution during Film Growth. *Journal of Vacuum Science and Technology A.* 2003;21(5):117–128. http://doi.org/10.1116/1.1601610

50. Varavka VN, Kudryakov OV, Ryzhenkov AV. Multilayered Nanocomposite Coatings for Anti-Erosive Protection. Chapter 5. In book: Ivan A Parinov. (ed) *Piezoelectrics and Nanomaterials: Fundamentals, Developments and Applications.* New York: Nova Science Publishers, Inc.; 2015. P. 105−132.

51. Кудряков О.В., Варавка В.Н., Забияка И.Ю., Ядрец Э.А., Караваев П.В. Морфология и генеалогия структурных дефектов в вакуумных ионно-плазменных покрытиях. *Advanced Engineering Research* (*Rostov-on-Don*). 2020;20(3):269−279. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2020-20-3-269-279

Kudryakov OV, Varavka VN, Zabiyaka IY, Yadrets EA, Karavaev PV. Morphology and Genealogy of Structural Defects in Vacuum Ion-Plasma Coatings. *Advanced Engineering Research* (*Rostov-on-Don*). 2020;20(3):269−279. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2020-20-3-269-279

52. Jien-Wei Yeh, Chen S-K, Su-Jien Lin, Jon-Yiew Gan, Tsung-Shune Chin, Tian Shun, et al. Nanostructured High-Entropy Alloys with Multiple Principal Elements: Novel Alloy Design Concepts and Outcomes. *Advanced Engineering Materials*. 2004;6(5):299–303. http://doi.org/10.1002/adem.200300567

53. Рогачев А.С. Структура, стабильность и свойства высокоэнтропийных сплавов. *Физика металлов и металловедение*. 2020;121(8):807–841. https://doi.org/10.31857%2FS0015323020080094

Rogachev AS. Structure, Stability, and Properties of High-Entropy Alloys. *Physics of Metals and Metallography*. 2020;121(8):807–841. https://doi.org/10.31857%2FS0015323020080094

54. Башев В.Ф., Кушнерев А.И. Структура и свойства высокоэнтропийного сплава $CoCrCuFeNiSn_x$. *Физика металлов и металловедение*. 2014;115(7):737–741. http://doi.org/10.7868/S0015323014040020

Bashev VF, Kushnerev AI. Structure and Properties of the High-Entropy Alloy $CoCrCuFeNiSn_x$. *Physics of Metals and Metallography*. 2014;115(7):737–741. http://doi.org/10.7868/S0015323014040020

55. Kuzminova YO, Firsov DG, Dagesyan SA, Konev SD, Sergeev SN, Zhilyaev AP, et al. Fatigue Behavior of Additive Manufactured CrFeCoNi Medium-Entropy Alloy. *Journal of Alloys and Compounds*. 2021;863:158609. http://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.158609

56. Cantor B. Multicomponent and High Entropy Alloys. *Entropy*. 2014;16(9):4749–4768. http://doi.org/10.3390/e16094749

57. Shou-Yi Chang, Chen-Yuan Wang, Chen-En Li, Yi-Chung Huang. 5-nm- Thick $(AlCrTaTiZrRu)N_{0.5}$ Multi-Component Barrier Layer with High Diffusion Resistance for Cu Interconnects. *Nanoscience and Nanotechnology Letters*. 2011;3(2)289–293. http://doi.org/10.1166/nnl.2011.1155

58. Miracle DB, Senkov ON. A Critical Review of High Entropy Alloys and Related Concepts. *Acta Materialia*. 2017;122:448–511. http://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.08.081

59. Погребняк А.Д., Комаров Ф.Ф., Береснев В.М., Константинов С.В., Салищев Г.А. *Многокомпонентные и высокоэнтропийные сплавы и нитридные покрытия на их основе*. Москва: ЛЕНАНД; 2021. 336 с.

Pogrebnyak AD, Komarov FF, Beresnev VM, Konstantinov SV, Salishchev GA. *Multicomponent and High-Entropy Alloys and Nitride Coatings Based on Them*. Moscow: LENAND; 2021. 336 p. (In Russ.)

60. Cantor B, Chang ITH, Knight P, Vincent AJB. Microstructural Development in Equiatomic Multicomponent Alloys. *Materials Science and Engineering: A*. 2004;375–377:213–218. http://doi.org/10.1016/j.msea.2003.10.257

61. Chin-You Hsu, Chien-Chang Juan, Woei-Ren Wang, Tsing-Shien Sheu, Jien-Wei Yeh, Swe-Kai Chen. On the Superior Hot Hardness and Softening Resistance of $AlCoCr_xFeMo_{0.5}Ni$ High-Entropy Alloys. *Materials Science and Engineering: A*. 2011;528(10/11):3581–3588. http://doi.org/10.1016/j.msea.2011.01.072

62. Chen TK, Shun TT, Yeh JW, Wong MS. Nanostructured Nitride Films of Multi-Element High-Entropy Alloys by Reactive DC Sputtering. *Surface and Coatings Technology*. 2004;188–189:193–200.0 http://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.08.023

63. Mann JB, Meek TL, Allen L C. Configuration Energies of the Main Group Elements. *Journal of the American Chemical Society*. 2000;122(12):2780–2783. http://doi.org/10.1021/ja992866e

64. Pogrebnjak AD, Bagdasaryan AA, Yakushchenko IV, Beresnev VM. The Structure and Properties of High-Entropy Alloys and Nitride Coatings Based on them. *Russian Chemical Reviews*. 2014;83(11):1027–1061. http://doi.org/10.1070/RC2014v083n11ABEH004407

65. Senkov ON, Woodward C, Miracle DB. Microstructure of Aluminum-Containing Refractory High-Entropy Alloys. *JOM*. 2014;66(10):2030–2042. http://doi.org/10.1007/s11837-014-1066-0

66. Панков В.П., Бабаян А.Л., Куликов М.В., Коссой В.А. Варламов Б.С. Теплозащитные покрытия лопаток турбин авиационных двигателей. *Ползуновский вестник.* 2021;(1):161–172.

Pankov VP, Babayan AL, Kulikov MV, Kossoy VA, Varlamov BS. Heat-Protection Coatings for Turbine Blades of Aircraft Gas Turbine Engines. *Polzunovskiy Vestnik.* 2021;(1):161–172.

67. Milošev I, Strehblow HH, Navinšek B. Comparison of TiN, ZrN and CrN Hard Nitride Coatings: Electrochemical and Thermal Oxidation. *Thin Solid Fims*. 1997;303(1-2):264–254. http://doi.org/10.1016/S0040-6090(97)00069-2

68. Novikov V, Stepanov N, Zherebtsov S, Salishchev G. Structure and Properties of High-Entropy Nitride Coatings. *Metals.* 2022;12(5):847. https://doi.org/10.3390/met12050847

69. Nagya P, Rohbeck N, Roussely G, Sortais P, Lábár JL, Gubicza J, et al. Processing and Characterization of a Multibeam Sputtered Nanocrystalline CoCrFeNi High-Entropy Alloy Film. *Surface and Coatings Technology*. 2020;386:125465. http://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.125465

70. Yurov VM, Platonova ES, Baltabekov A. High Entropy Coatings CuTiZrCrNi. *Norwegian Journal of Development of the International Science.* 2019;36:25–29.

71. Юров В.М., Гученко С.А., Маханов К.М. Атомно-силовая микроскопия высокоэнтропийных покрытий. *International Journal of Applied and Fundamental Research.* 2020;(4):62–67. URL: https://s.applied-research.ru/pdf/2020/4/13056.pdf (дата обращения: 03.09.2024).

Yurov VM, Guchenko SA, Makhanov KM. Atomic-Power Microscopy of High-Entropy Coatings. *International Journal of Applied and Fundamental Research.* 2020;(4):62–67. URL: https://s.applied-research.ru/pdf/2020/4/13056.pdf (accessed: 03.09.2024).

72. Junjun Wang, Shaofu Kuang, Xu Yu, Linqing Wang, Weijiu Huang. Tribo-Mechanical Properties of CrNbTiMoZr High-Entropy Alloy Film Synthesized by Direct Current Magnetron Sputtering. *Surface and Coating Technology*. 2020;403:126374. http://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126374

73. Wu H, Zhang S, Wang ZY, Zhang CH, Chen HT, Chen J. New Studies on Wear and Corrosion Behavior of Laser Cladding $FeNiCoCrMo_x$ High-Entropy Alloy Coating: The Role of Mo. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2022;102:105721. http://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2021.105721

74. Tüten N, Canadinc D, Motallebzadeh A, Bal B. Microstructure and Tribological Properties of TiTaHfNbZr High Entropy Alloy Coatings Deposited on Ti-6Al-4V Substrates. *Intermetallics*. 2019;105:99–106. http://doi.org/10.1016/j.intermet.2018.11.015

75. Коротаев А.Д., Борисов Д.П., Мошков В.Ю., Овчинников С.В., Тюменцев А.Н., Прибытков Г.А. Особенности структурно-фазового и упругонапряженного состояния нанокомпозитных сверхтвердых покрытий на основе TiN. *Физическая мезомеханика*. 2011;14(5):87–97.

Korotaev AD, Borisov DP, Moshkov VYu, Ovchinnikov SV, Tyumentsev AN, Pribytkov GA. Peculiarities of the Structural-Phase and Elastic Stress States of Superhard TiN-Based Nanocomposite Coatings. *Physical Mesomechanics*. 2011;14(5):87–97.

76. Погребняк А.Д. Якущенко И.В., Бондар О.В., Береснев В.М., Соболь О.В., Андреев А.А. и др. Влияние параметров осаждения нитридов высокоэнтропийных сплавов (Ti-Zr-Hf-V-Nb)N на их структуру, состав, механические и трибологические свойства. *Сверхтвердые материалы*. 2013;(6):4–19.

Pogrebnyak AD, Yakushchenko IV, Bondar OV, Beresnev VM, Sobol OV, Andreev AA, et al. Influence of Nitride Deposition Parameters of High-Entropy Alloys (Ti-Zr-Hf-V-Nb)N on Their Structure, Composition, Mechanical and Tribological Properties. *Journal of Superhard Materials*. 2013;(6):4–19. (In Russ.)

77. Milošev I, Strehblow HH, Navinšek B. Comparison of TiN, ZrN and CrN Hard Nitride Coatings: Electrochemical and Thermal Oxidation. *Thin Solid Films*. 1997;303(1-2):246–254. http://doi.org/10.1016/S0040-6090(97)00069-2

78. Veprek S. The Search for Novel, Superhard Materials. *Journal of Vacuum Science and Technology A*. 1999;17:2401–2420. http://doi.org/10.1116/1.581977

79. Jien-Wei Yeh. Recent Progress in High-Entropy Alloy. *Annales de Chimie. Science des Matériaux*. 2006;31(6):633–648. http://doi.org/10.3166/acsm.31.633-648

80. Jen-Hao Song, Sheng-Chang Wang, James C Sung, Jow-Lay Huang, Ding-Fwu Lii. Characterization of Reactively Sputtered C-Axis Orientation (Al, B)N Films on Diamond. *Thin Solid Films*. 2009;517(17):4753–4757. http://doi.org/10.1016/j.tsf.2009.03.125

81. Braic V, Vladescu A, Balaceanu M, Luculescu CR, Braic M. Nanostructured Multi-Element (TiZrNbHfTa)N and (TiZrNbHfTa)C Hard Coatings. *Surface and Coating Technology*. 2012;211:117–121. http://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2011.09.033

82. Shih-Chang Liang, Du-Cheng Tsai, Zue-Chin Chang, Huan-Shin Sung, Yi-Chen Lin, Yi-Jung Yeh, et al. Structural and Mechanical Properties of Multi-Element (TiVCrZrHf)N Coatings by Reactive Magnetron Sputtering. *Applied Surface Science*. 2011;258(1):399–403. http://doi.org/10.1016/j.apsusc.2011.09.006

83. Du-Cheng Tsai, Zue-Chin Chang, Li-Yu Kuo, Tien-Jen Lin, Tai-Nan Lin, Fuh-Sheng Shieu. Solid Solution Coating of (TiVCrZrHf)N with Unusual Structural Evolution. *Surface and Coatings Technology*. 2013;217:84–87. http://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.11.077

84. Du-Cheng Tsai, Fuh-Sheng Shieu, Shou-Yi Chang, Hsiao-Chiang Yao, Min-Jen Deng. Structures and Characterizations of TiVCr and TiVCrZrY Films Deposited by Magnetron Sputtering under Different Bias Powers. *Journal of The Electrochemical Society*. 2010;157(3):52–58. http://doi.org/10.1149/1.3285047

85. Ma C-H, Huang J–H, Haydn Chen. Nanohardness of Nanocrystalline TiN Thin Films. *Surface and Coatings Technology*. 2006;200(12-13):3868–3875. http://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.10.098

86. Hsiao-Chiang Yao, Ming-Chieh Chiu, Wen-Tang Wu, Fuh-Sheng Shieu. Influence of Radio Frequency Bias on the Characteristics of TiO_2 Thin Films Prepared by DC Sputtering. *Journal of The Electrochemical Society*. 2006;153(10):237–243. http://doi.org/10.1149/1.2221866

87. Ворошилов Ю.В., Павлишин В.И. *Основы кристаллографии и кристаллохимии. Рентгенография кристаллов.* Киев: КНТ; 2011. 568 с.

Voroshilov YuV, Pavlishin VI. *Fundamentals of Crystallography and Crystal Chemistry. Crystal Radiography*. Kiev: KNT; 2011. 568 p. (In Russ.)
88. Головин Ю.И. Наноиндентирование и его возможности. Москва: Машиностроение; 2009. 312 с.
Golovin YuI. Nanoindentation and Its Capabilities. Moscow: Mashinostroenie; 2009. 312 p. (In Russ.)

Об авторах:
Кирилл Николаевич Политыко, аспирант, младший научный сотрудник кафедры теоретической механики Ростовского государственного университета путей сообщения (344038, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. им. Ростовского стрелкового полка народного ополчения, 2), SPIN-код, ORCID, polityko856@gmail.com

Игорь Владимирович Колесников, доктор технических наук, член-корреспондент РАН, профессор кафедры теоретической механики Ростовского государственного университета путей сообщения (344038, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. им. Ростовского стрелкового полка народного ополчения, 2), SPIN-код, ORCID, ScopusID, ivkolesnikov@bk.ru

Дмитрий Сергеевич Мантуров, кандидат технических наук, заведующий лабораторией кафедры теоретической механики Ростовского государственного университета путей сообщения (344038, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. им. Ростовского стрелкового полка народного ополчения, 2), SPIN-код, ORCID, ScopusID, ResearcherID, manturovds@rgups.ru

Заявленный вклад авторов:
К.Н. Политыко: анализ литературных источников, подготовка текста.
И.В. Колесников: научное руководство, формирование целей и задач исследования.
Д.С. Мантуров: доработка текста, корректировка выводов.

***Конфликт интересов*: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:
Kirill N. Polityko, postgraduate student, Junior Research Fellow of the Engineering Mechanics Department, Rostov State Transport University (2, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya Sq., Rostov-on-Don, 344038, Russian Federation), SPIN-code, ORCID, politykokirill@yandex.ru

Igor V. Kolesnikov, Dr.Sci. (Eng.), Corresponding Member of RAS, Professor of the Engineering Mechanics Department, Rostov State Transport University (2, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya Sq., Rostov-on-Don, 344038, Russian Federation), SPIN-code, ORCID, ScopusID, ivkolesnikov@bk.ru

Dmitry S. Manturov, Cand.Sci. (Eng.), Head of the Laboratory of the Engineering Mechanics Department, Rostov State Transport University, (2, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya Sq., Rostov-on-Don, 344038, Russian Federation), SPIN-code, ORCID, ScopusID, ResearcherID, manturovds@rgups.ru.

Claimed Contributorship:
KN Polityko: analysis of literature sources, preparation of the text.
IV Kolesnikov: academic advising, research objectives and tasks formulation.
DS Manturov: finalization of the text, correction of the conclusions.

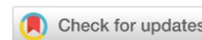
***Conflict of Interest Statement:* the authors claimed no conflict of interest.**

All authors have read and approved the final manuscript.

Поступила в редакцию / Received 10.09.2024
Поступила после рецензирования / Reviewed 29.09.2024
Принята к публикации / Accepted 14.10.2024

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE





УДК 661.846
https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-4-392-401

Оригинальное эмпирическое исследование

Разработка метода получения наноразмерного карбоната магния, стабилизированного хитозаном, как основы скаффолд-матриксов для регенеративной медицины



EDN: KXALAI

А.В. Блинов, З.А. Рехман ✉, А.А. Гвозденко, М.А. Ясная, М.А. Колодкин, М.А. Тараванов
Северо-Кавказский федеральный университет, г. Ставрополь, Российская Федерация
✉ zafrehman1027@gmail.com

Аннотация

Введение. В открытом доступе достаточно литературы о методах лечения опорно-двигательного аппарата. Описаны возможности устранения дефектов кости с использованием собственных (аутологичных) костей пациентов. Авторы теоретических и прикладных исследований предлагают применять также синтетические биоинертные материалы из полимеров, фосфатов кальция, пластмасс, металлов. Изучено создание на основе скаффолдов трехмерных матриц для формирования систем, по структуре максимально близких костной ткани. Известно, что действующими веществами скаффолд-матрицы могут быть гидроксиапатит, трикальций фосфат, а также силикаты, карбонаты магния, кальция, меди, цинка и марганца. Вопрос нуждается в детальной проработке. В свете заявленной проблемы особенности перечисленных материалов следует изучать по отдельности. Таких публикаций нет. Представленная работа призвана восполнить данный пробел. Ее цель — создание метода синтеза и исследование свойств наноразмерного карбоната магния.

Материалы и методы. Материалами для исследования послужили образцы наночастиц карбоната магния, полученные химическим осаждением в воде. Их изучали методами рентгеновской дифрактометрии, сканирующей электронной микроскопии, инфракрасной спектроскопии и динамического рассеяния света. Квантово-химическое моделирование проводили при помощи программы QChem и молекулярного редактора IQmol.

Результаты исследования. Установлено, что частицы карбоната магния — стержнеобразные, длиной от 2 до 10 мкм. Они состоят из наночастиц от 30 до 60 нм. Благодаря квантово-химическому моделированию выявлены энергетические особенности взаимодействия основного карбоната магния, во-первых, с хитозаном с карбонатом, а во-вторых, с отдельной молекулой хитозана. В первом случае значение энергии ниже, во втором — выше. Это указывает на химическую и энергетическую выгоду образования таких комплексов. Определены соответствующие показатели для оптимального варианта координирования карбоната магния с хитозаном. В этом случае взаимодействие обеспечивает гидроксильная группа хитозана, присоединенная к C_6 остатку глюкозамина. Для данного процесса отмечена самая низкая энергия $\Delta E = 462{,}387$ ккал/моль и химическая жесткость $\eta = 0{,}062$ эВ. Наночастицы карбоната магния обладают оптимальными радиусом и дзета-потенциалом при следующих параметрах исходных реагентов: 0,018 моль карбоната аммония, 0,03 моль ацетата магния, 0,15 г хитозана.

Обсуждение и заключение. Полученные данные свидетельствуют о том, что наноразмерный основной карбонат магния — это перспективный материал с широкими возможностями практического применения. С этой точки зрения особый интерес представляет его роль в процессах обмена, а именно в усвоении макронутриентов. Синтезированный в среде биополимера наноразмерный остеотропный микронутриент магния можно использовать как биологически активный наполнитель трехмерных скаффолд-матриксов. Реализация данного решения в медицинской практике позволит повысить эффективность восстановления костной ткани.

Ключевые слова: травмы опорно-двигательного аппарата, устранение дефектов кости, аналог костной ткани, наноразмерный карбонат магния, остеотропный микронутриент магния, скаффолд-матрикс

Благодарности. Коллектив авторов выражает благодарность Ирине Михайловне Шевченко, кандидату технических наук, доценту кафедры физики и технологии наноструктур и материалов физико-технического факультета Северо-Кавказского федерального университета, за помощь в написании и корректировке данной работы.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания по Соглашению о предоставлении субсидии из федерального бюджета № 075–03–2024–239/7 на тему «Трехмерные биополимерные скаффолд-матриксы, обогащенные наночастицами остеотропных микронутриентов, для регенерации костных тканей» (проект FSRN–2023–0037).

Для цитирования. Блинов А.В., Рехман З.А., Гвозденко А.А., Ясная М.А., Колодкин М.А., Тараванов М.А. Разработка метода получения наноразмерного карбоната магния, стабилизированного хитозаном, как основы скаффолд-матриксов для регенеративной медицины. *Advanced Engineering Research* (*Rostov-on-Don*). 2024;24(4):392–401. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-4-392-401

Original Empirical Research

Development of a Method for Obtaining Nanoscale Magnesium Carbonate Stabilized with Chitosan as the Basis of Scaffold Matrices for Regenerative Medicine

Andrey V. Blinov, Zafar A. Rekhman ✉, Alexey A. Gvozdenko, Maria A. Yasnaya, Maxim A. Kolodkin, Maxim A. Taravanov

North Caucasus Federal University, Stavropol, Russian Federation

✉ zafrehman1027@gmail.com

Abstract

Introduction. In the public domain there is enough literature on methods of treating the musculoskeletal system. The possibilities of eliminating bone defects using patients' own (autologous) bones are described. The authors of theoretical and applied studies also suggest using synthetic bioinert materials made of polymers, calcium phosphates, plastics, and metals. The creation of three-dimensional matrices based on scaffolds for the formation of systems that are as close as possible to bone tissue in structure has been studied. It is known that the active substances of the scaffold matrix can be hydroxyapatite, tricalcium phosphate, as well as silicates, carbonates of magnesium, calcium, copper, zinc, and manganese. The issue requires detailed study. In light of the stated problem, the features of the listed materials should be considered separately. There are no such publications. The presented work is intended to fill this gap. Its objective is to create a synthesis method and study the properties of nanoscale magnesium carbonate.

Materials and Methods. The materials for the study were samples of magnesium carbonate nanoparticles obtained by chemical precipitation in water. They were studied using X-ray diffractometry, scanning electron microscopy, infrared spectroscopy, and dynamic light scattering. Quantum-chemical modeling was performed using the QChem program and the IQmol molecular editor.

Results. It has been established that magnesium carbonate particles are rod-shaped, 2 to 10 μm in length. They consist of nanoparticles from 30 to 60 nm. Quantum-chemical modeling has revealed the energy features of the interaction of the basic magnesium carbonate, firstly, with chitosan with carbonate, and secondly, with a separate chitosan molecule. In the first case, the energy value is lower, in the second, it is higher. This indicates the chemical and energetic advantage of forming such complexes. The corresponding indices for the optimal coordination of magnesium carbonate with chitosan have been determined. In this case, the interaction is provided by the hydroxyl group of chitosan attached to the C_6 residue of glucosamine. For this process, the lowest energy ΔE=462.387 kcal/mol and chemical hardness η=0.062 eV are noted. Magnesium carbonate nanoparticles have optimal radius and zeta potential with the following parameters of the initial reagents: 0.018 mol of ammonium carbonate, 0.03 mol of magnesium acetate, 0.15 g of chitosan.

Discussion and Conclusion. The obtained data indicate that nanoscale basic magnesium carbonate is a promising material with a wide range of possibilities of practical application. From this point of view, its role in metabolic processes, namely in the assimilation of macronutrients, is of particular interest. Nanoscale osteotropic magnesium micronutrient synthesized in a biopolymer environment can be used as a biologically active filler for three-dimensional scaffold matrices. Implementation of this solution in medical practice will improve the efficiency of bone tissue restoration.

Keywords: musculoskeletal injuries, bone defect repair, bone tissue analogue, nanoscale magnesium carbonate, osteotropic magnesium micronutrient, scaffold matrix

Acknowledgements. The composite authors would like to thank Irina Mikhailovna Shevchenko, Cand.Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Physics and Technology of Nanostructures and Materials, Physics and Technology Faculty, North-Caucasus Federal University, for her assistance in writing and correcting this paper.

Funding Information. The research was done with the financial support from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the government task under the Agreement on the provision of a subsidy from the federal budget No. 075–03–2024–239/7 on the topic "Three-Dimensional Biopolymer Scaffold Matrices Enriched with Nanoparticles of Osteotropic Micronutrients for Bone Tissue Regeneration" (project FSRN–2023–0037).

For citation. Blinov AV, Rekhman ZA, Gvozdenko AA, Yasnaya MA, Kolodkin MA, Taravanov MA. Development of a Method for Obtaining Nanoscale Magnesium Carbonate Stabilized with Chitosan as the Basis of Scaffold Matrices for Regenerative Medicine. *Advanced Engineering Research* (*Rostov-on-Don*). 2024;24(4):392–401. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-4-392-401

Введение. Регенеративной медицине постоянно требуются материалы, которые способствуют ускорению регенерации костной ткани [1]. Даже с появлением новых решений проблема сохраняет актуальность, т. к. переломы — очень распространенный вид травм [2]. Отметим, что пациенты полностью восстанавливаются лишь в 16 % случаев. По данным Всемирной организации здравоохранения, в мире фиксируется порядка 50 млн тяжелых травм, которые приводят к потере трудоспособности и инвалидности. Поэтому лечение дефектов костных тканей — актуальная медицинская и социальная проблема [3]. Чтобы помочь пациенту, используют трехмерные биополимерные матрицы на основе скаффолдов. Они содержат элементы, близкие по структуре к соединительной костной ткани. Один из таких материалов для регенеративной медицины — наноразмерные формы карбоната магния [4]. Магний — это эссенциальный микроэлемент [5]. Он отвечает за крепость костей [6] и участвует в их формировании [7]. На его основе создаются ортопедические имплантаты [8]. В наноразмерной форме карбонат магния обладает такими свойствами, как:

- низкая токсичность;
- хорошая биосовместимость;
- проницаемость для лекарственных средств [9].

В биологических взаимодействиях важную роль играют шероховатость и химический состав поверхности элементов [10]. Будущие материалы на основе соединений в нанометровом диапазоне могут в конечном итоге изменить природу тканей вокруг имплантата и повысить клиническую успешность такого подхода [11]. Для улучшения названных выше свойств применяют биополимеры. Один из них — хитозан [12]. Это важный биосовместимый компонент соединительной ткани. Он хорошо растворяется и разлагается [13].

Основная цель данного исследования — создание метода синтеза стабилизированного хитозаном наноразмерного карбоната магния, а также исследование его свойств. Материал рассматривается как основа скаффолд-матриксов для регенеративной медицины.

Материалы и методы. Методом химического осаждения наночастицы карбоната магния синтезировали из магнийсодержащего прекурсора — ацетата магния. Осадителем был карбонат аммония, стабилизатором — полисахарид хитозан. На первом этапе в раствор ацетата магния добавляли необходимый объем 1 % раствора хитозана. Далее с помощью капельной воронки при постоянном перемешивании в раствор прекурсора вводили раствор осадителя со скоростью 60 капель в минуту. После введения всего раствора осадителя полученный золь перемешивали еще 10 минут. Синтезированный золь прокрутили в центрифуге, а затем высушили в сушильном шкафу. Так получили образцы порошка карбоната магния. Их фазовый состав исследовали с помощью метода порошковой дифрактометрии на приборе Empyrean (производитель PANalytical, Нидерланды) при следующих параметрах измерений:

- медный катод (длина волны излучения — 1,54 Å);
- диапазон измерения — 10–90о 2θ;
- частота дискретизации — 0,01о 2θ.

Микроструктуру образцов карбоната магния исследовали с помощью сканирующего электронного микроскопа MIRA3-LMH (Tescan, Чехия).

Для подготовки проб двухсторонний проводящий углеродный скотч помещали на приборный столик (12 мм), наносили порошок исследуемого материала и углеродный слой толщиной 10 нм. Параметры измерения:

- ускоряющее напряжение — 10 кВ;
- значение фокусного расстояния — 4,9 мм;
- детектор In-Beam SE.

Для компьютерного квантово-химического моделирования карбоната магния при взаимодействии с хитозаном использовали программное обеспечение QChem. Для исследования выбрали метод Хартри — Фока и базисный набор 6–31G[1]. Для конфигурации молекул задействовали молекулярный редактор IQmol [14]. Образцы исследовали методом инфракрасной (ИК) спектроскопии. С этой целью применили ИК-спектрометр с Фурье-преобразованием. Модель ФСМ 1201 (Россия).

[1] Здесь 6–31G — базисный набор, который использовался в данном исследовании. STO-nG — это семейство базисных наборов орбиталей слейтеровского типа.

Порошки *$MgCO_3$* и *KBr* тщательно смешивали в соотношении 1:300 и прессовали в виде таблетки в специальной пресс-форме под давлением 500–1 000 МПа. Полученные образцы помещали в спектрометр и проводили измерения в пределах — 400–4 400 $см^{-1}$.

Методом динамического рассеяния света на приборе Photocor complex (Россия) исследовали средний гидродинамический радиус наночастиц карбоната магния, стабилизированных хитозаном. Их ζ-потенциал оценивали с помощью метода акустической и электроакустической спектроскопии на спектрометре DT–1202 (Dispersion Technology Inc., США).

Метод получения наночастиц карбоната магния оптимизировали с помощью многофакторного эксперимента. Для этого использовали параметры:

- три переменных (содержание ацетата магния, карбоната аммония и хитозана);
- два выходных (средний гидродинамический радиус и дзета-потенциал) [15].

Данные обработали с помощью программы Statistica 10.0. Уровни варьирования представлены в таблице 1.

Таблица 1

Уровни варьирования переменных

Наименование параметров	Уровни варьирования переменных		
Содержание ацетата магния, моль	0,012	0,024	0,030
Содержание карбоната аммония, моль	0,012	0,024	0,030
Масса хитозана, г	0,150	0,300	0,450

Далее строили матрицу планирования эксперимента (таблица 2).

Таблица 2

Матрица планирования эксперимента

№	Объем 0,8 М раствора ацетата	Объем 0,8 М раствора карбоната	Объем раствора хитозана, мл
1	15	15	15
2	15	30	30
3	15	45	45
4	30	15	30
5	30	30	45
6	30	45	15
7	45	15	45
8	45	30	15
9	45	45	30

Результаты исследования. На первом этапе изучили фазовый состав полученных образцов. Результаты представлены на рис. 1.

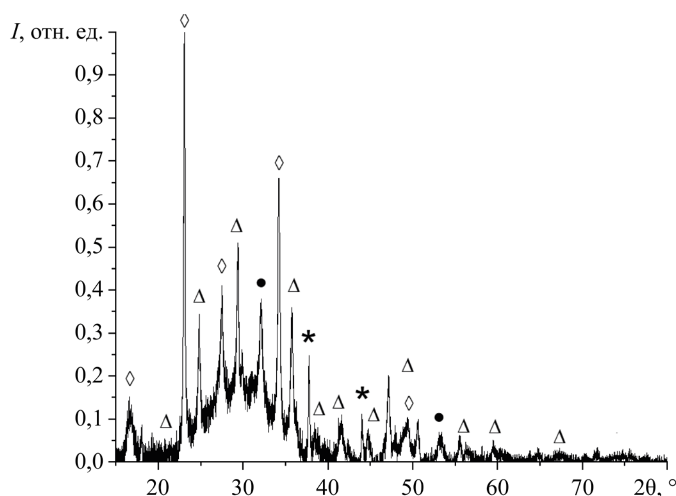


Рис. 1. Дифрактограмма образца наноразмерного карбоната магния, стабилизированного хитозаном. Здесь ● — $MgCO_3$, ◊ — $Mg_2(CO_3)(OH)_2$ $3H_2O$, Δ — $MgCO_3 \cdot 5H_2O$,* — MgO

Далее при помощи сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) исследовали микроструктуру полученных образцов наночастиц карбоната магния, стабилизированных хитозаном (рис. 2).

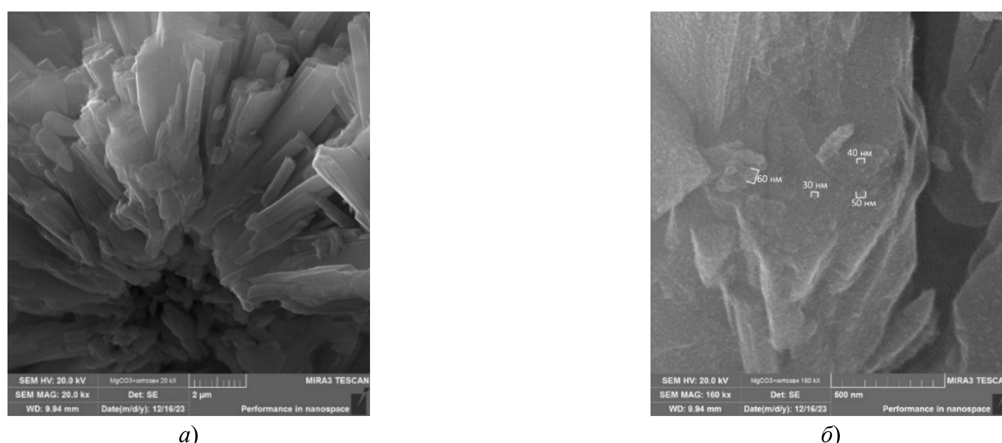


Рис. 2. СЭМ-микрофотографии образца наночастиц карбоната магния, стабилизированных хитозаном: *а* — увеличение в 20 000 раз; *б* — увеличение в 160 000 раз

Для исследования способа координирования наночастиц карбоната магния с хитозаном проводили квантово-химическое моделирование молекулярных структур карбоната магния с хитозаном. Результаты показаны в таблице 3 и на рис. 3, 4. Здесь *HOMO* — высшая заселенная молекулярная орбиталь, *LUMO* — низшая свободная молекулярная орбиталь.

Таблица 3

Результаты квантово-химических расчетов молекулярных структур карбоната магния и основного карбоната магния с хитозаном

Взаимодействие	Тип соединения магния	*E*, ккал/моль	Δ*E*, ккал/моль	E_{HOMO}, эВ	E_{LUMO}, эВ	η, *эВ*
Мономерное звено хитозана	–	–1 258,049	–	–0,225	0,030	0,128
Через гидроксильную группу, которая присоединена к C_6 остатку глюкозамина	$MgCO_3$	–1 720,436	462,387	–0,161	–0,037	0,062
	$Mg(OH)_2CO_3$	–1 994,103	736,054	–0,179	–0,111	0,034
Через гидроксильную группу, которая присоединена к C_3 остатку глюкозамина	$MgCO_3$	–1 720,366	462,317	–0,167	–0,042	0,063
	$Mg(OH)_2CO_3$	–1 994,273	736,224	–0,182	–0,064	0,059
Через аминогруппу, которая присоединена к C_2 остатку глюкозамина	$MgCO_3$	–1 720,418	462,369	–0,124	–0,019	0,053
	$Mg(OH)_2CO_3$	–1 994,104	736,055	–0,156	–0,048	0,054

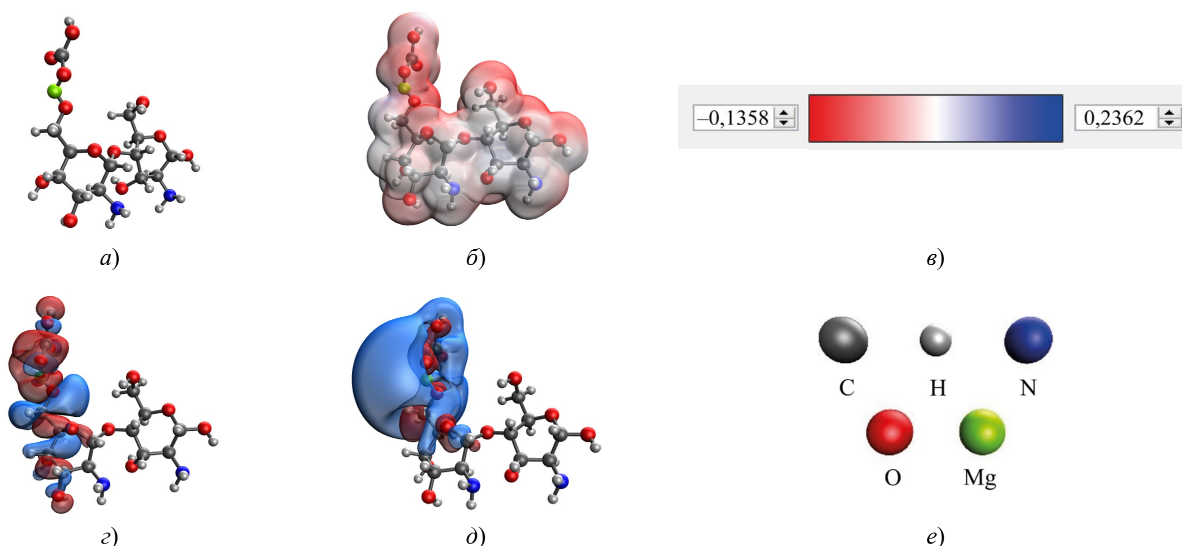


Рис. 3. Результаты моделирования взаимодействия хитозана с карбонатом магния через гидроксильную группу, присоединенную к C_6 остатку глюкозамина в хитозане: *а* — модель комплекса; *б* — распределение электронной плотности; *в* — градиент распределения электронной плотности; *г* — *HOMO*; *д* — *LUMO*; *е* — расшифровка атомов

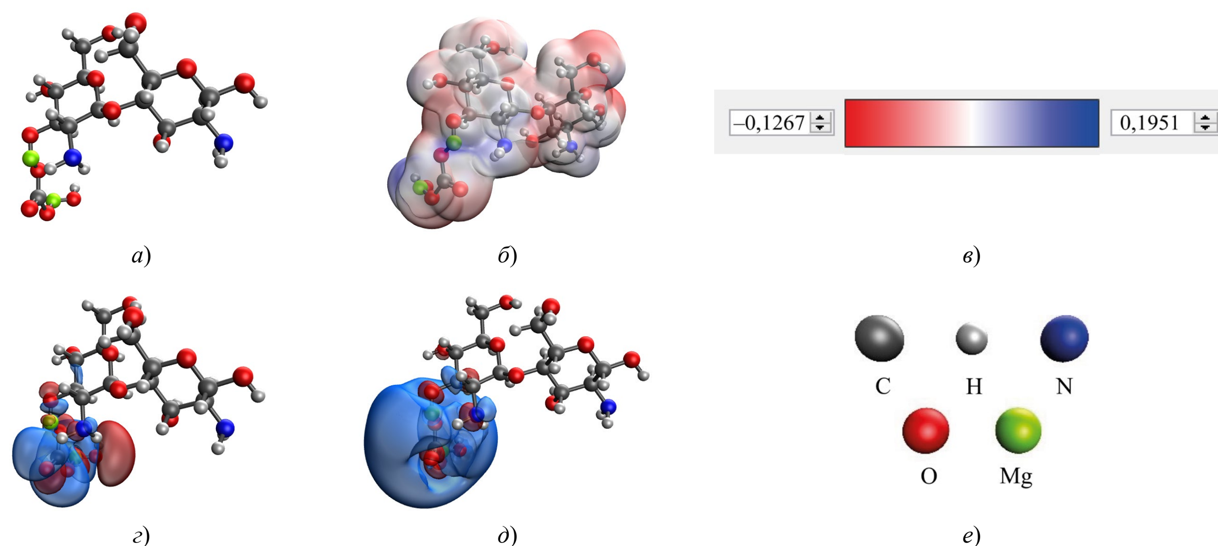


Рис. 4. Результаты моделирования взаимодействия хитозана с основным карбонатом магния через гидроксильную группу, присоединенную к C_3 остатку глюкозамина в хитозане: *а* — модель комплекса; *б* — распределение электронной плотности; *в* — градиент распределения электронной плотности; *г* — *HOMO*; *д* — *LUMO*; *е* — расшифровка атомов

Для подтверждения данных квантово-химического моделирования образцы исследовались методом инфракрасной спектроскопии. Результаты представлены на рис. 5.

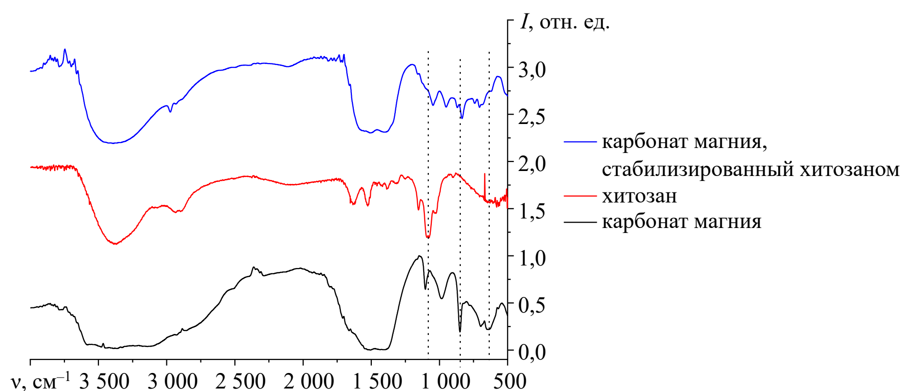


Рис. 5. ИК-спектр наночастиц карбоната магния, стабилизированных хитозаном

Для изучения влияния входных параметров на синтез наноразмерного карбоната магния формировали тернарные зависимости. На рис. 6 представлена зависимость среднего гидродинамического радиуса наночастиц от содержания исходных реагентов.

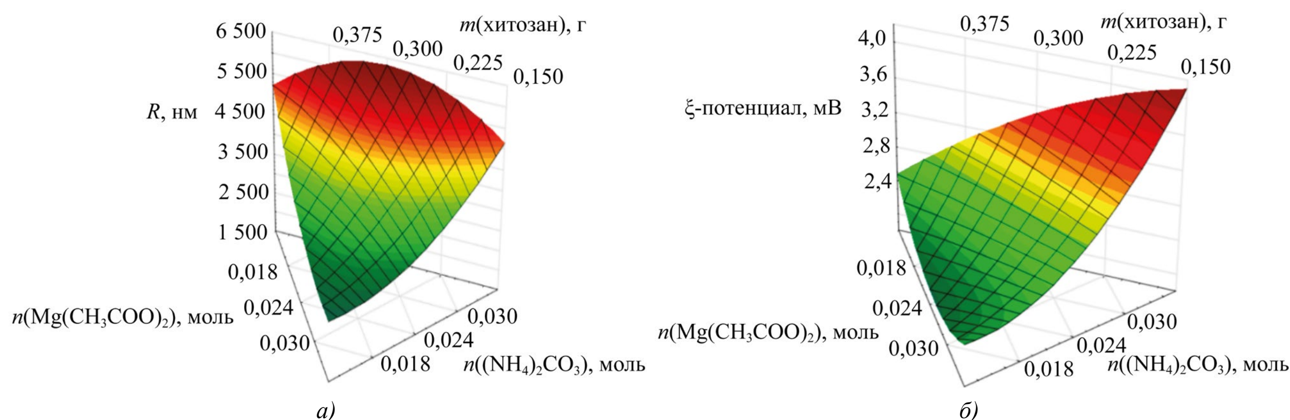


Рис. 6. Зависимости изменения среднего гидродинамического радиуса и электрокинетического потенциала от концентраций исходных реагентов: *а* — тернарная поверхность, описывающая влияние исходных реагентов на размер частиц карбоната магния; *б* — тернарная поверхность, описывающая влияние исходных реагентов на электрокинетический потенциал частиц карбоната магния

Анализ фазового состава образцов показал, что присутствуют фазы карбоната магния безводного ($MgCO_3$), две конфигурации карбоната магния в виде кристаллогидрата ($MgCO_3 \cdot 5H_2O$), $Mg_2(CO_3)(OH)_2 \cdot 3H_2O$ и оксида магния (MgO).

При анализе микроструктуры поверхности наночастиц карбоната магния установлено, что образец обладает анизотропной формой. Карбонат магния представлен стержнеобразными частицами длиной от 2 до 10 мкм, которые состоят из наночастиц размером от 30 до 60 нм.

Компьютерное квантово-химическое моделирование позволило сравнить энергию при взаимодействии с основным карбонатом магния:

- хитозана с карбонатом;
- отдельной молекулы хитозана.

В первом случае значение энергии будет ниже, чем во втором. Это указывает на химическую и энергетическую выгоду образования таких комплексов (для карбоната магния энергия взаимодействия более 462,00 ккал/моль, а для основного карбоната — более 736,00 ккал/моль).

В оптимальном варианте координирования карбоната магния с хитозаном взаимодействие происходит через гидроксильную группу хитозана, присоединенную к C_6 остатку глюкозамина. Данное взаимодействие имеет самую низкую энергию ΔE = 462,387 ккал/моль и химическую жесткость η = 0,062 эВ.

Положение функциональных групп определяли по ИК-спектроскопии наночастиц карбоната магния, стабилизированных хитозаном. Дополнительно фиксировали спектры чистого хитозана и карбоната магния. Анализ ИК-спектра карбоната магния показал, что в области от 2 200 до 3 000 $см^{-1}$ находятся валентные колебания групп NH_3^+, NH_2^+, NH^+ и CH_2, $–CH_3$. Полосы на 988 $см^{-1}$, 1 102 $см^{-1}$, 1 414 $см^{-1}$ и 1 529 $см^{-1}$ связаны с колебаниями C–O и C=O в группе CO_3^2 [16]. Полоса на 620 $см^{-1}$ соответствует колебаниям гидроксильной группы, а полосы на 698 и 852 $см^{-1}$ обусловлены колебаниями связи Mg–O [17].

Анализ ИК-спектров хитозана показал, что область от 2 500 до 3 400 $см^{-1}$ отвечает за валентные колебания следующих функциональных групп: –OH, $–CH_3$, CH_2 [18]. Область от 1 000 до 1900 $см^{-1}$ характеризует колебания связей C–O, C–O–C, $–CH_2$, $–CH_3$, C–N, NH_2^+ [19]. Область полос от 500 до 900 $см^{-1}$ относится к деформационным колебаниям: на 898 $см^{-1}$ — связи C–H [20], на 581, 652, 704 и 768 $см^{-1}$ — связей –CH и $–CH_2$.

Как показал анализ образца наночастиц карбоната магния, стабилизированных хитозаном, в диапазоне от 2100 до 3000 $см^{-1}$ находятся валентные колебания групп NH_3^+, NH_2^+, NH^+, $–CH_3$, CH_2, O–H. Это характерно для молекулы хитозана. Также присутствуют полосы на 1414 $см^{-1}$ и 1529 $см^{-1}$, которые соответствуют колебаниям C–O и C=O в группе CO_3^2, что подтверждает наличие функциональных групп карбоната магния в системе [21]. Связывание магния подтверждается наличием деформационных колебаний C–O и C=O в группе CO_3^{2-} и колебаний связи Mg–O и CO_3^{2-} в диапазоне от 700 до 1 100 $см^{-1}$ [22].

Отмечается уменьшение интенсивности пиков на 620 $см^{-1}$ и 1 078 $см^{-1}$, которые соответствуют колебаниям O–H и C–O групп. Это указывает на взаимодействие карбоната магния и хитозана через гидроксильные группы и согласуется с результатами квантово-химического моделирования.

Изучение полученных тернарных поверхностей приводит к выводу, что изменение соотношения между ацетатом магния и карбонатом аммония заметно влияет на размер и дзета-потенциал частиц карбоната магния. Средний гидродинамический радиус частиц не зависит от содержания хитозана. Однако изменение дзета-потенциала связано с содержанием стабилизатора и концентрацией осадителя, что важно для оценки стабильности наноразмерных систем. В результате были выбраны параметры исходных реагентов, при которых образец наночастиц карбоната магния обладает оптимальными радиусом и дзета-потенциалом:

- 0,018 моль карбоната аммония;
- 0,03 моль ацетата магния;
- 0,15 г хитозана.

Обсуждение и заключение. Магний в составе карбоната магния необходим для нормального функционирования организма. В процессах обмена он обеспечивает эффективное усвоение макронутриентов. Это позволяет говорить об актуальности и потенциальной востребованности метода получения наноразмерного карбоната магния, стабилизированного хитозаном. Данный подход разработан и оптимизирован в рамках представленной научной работы. Установлено, что наночастицы карбоната магния представляют собой агломераты стержнеобразной формы длиной от 2 до 10 мкм. Эти скопления состоят из наночастиц размером от 30 до 60 нм. Оптимальный способ координирования молекул — взаимодействие карбоната магния через гидроксильную группу в C_6 остатке глюкозамина в молекуле хитозана. Преимущество обеспечивается значительными показателями энергии и химической жесткости.

ИК-спектроскопия образцов наночастиц карбоната магния, стабилизированных хитозаном, выявила падение интенсивности полос, которые характеризуют колебания O–H группы (для карбоната магния) и колебания группы C–O (для хитозана). Из этого следует, что взаимодействие происходит через гидроксильные группы хитозана.

Выполненная в рамках представленной работы оптимизация метода синтеза наночастиц карбоната магния, стабилизированных хитозаном, позволяет сделать ряд утверждений.

1. При увеличении содержания ацетата магния уменьшаются размер частиц и электрокинетический потенциал наноразмерного карбоната магния.

2. При увеличении концентрации карбоната аммония растет средний гидродинамический радиус и заряд поверхности наночастиц карбоната магния.

3. Концентрация хитозана незначительно виляет на радиус частиц, однако при увеличении его содержания уменьшается заряд поверхности.

Список литературы / References

1. Канев А.А., Кураков Ф.А., Черченко О.В., Цветкова Л.А. Развитие регенеративной медицины в России и в мире: исследователи-лидеры и технологические драйверы. *Экономика науки.* 2022;8(3/4):202–219. https://doi.org/10.22394/2410–132X–2022–8–3–4–202–219

Kanev AA, Kurakov FA, Cherchenko OV, Tsvetkova LA. The Development of Regenerative Medicine in Russia and in the World: Leading Researchers and Technological Drivers. *Economics of Science*. 2022;8(3–4):202–219. https://doi.org/10.22394/2410–132X–2022–8–3–4–202–219

2. Safronova TV. Inorganic Materials for Regenerative Medicine. *Inorganic Materials.* 2021;57(5):443–474. https://doi.org/10.1134/S002016852105006X

3. Агазаде А.Р., Агазаде Р.Р., Гергиева Т.Ф., Амхадов И.С., Кадиев А.А., Мамедов С.Э. и др. Оценка эффективности лечения и мониторинга пациентов с системными нарушениями костной ткани при проведении дентальной имплантации. *Медицинский алфавит.* 2023;1(1):44–49. https://doi.org/10.33667/2078–5631–2023–1–44–49

Agazade AR, Agazade RR, Gergieva TF, Amkhadov IS, Kadiev AA, Mamedov SE, et al. Evaluation of the Effectiveness of Treatment and Monitoring of Patients with Systemic Disorders of Bone Tissue during Dental Implantation. *Medical Alphabet*. 2023;1(1):44–49. https://doi.org/10.33667/2078–5631–2023–1–44–49

4. Голубева А.Н. Правильное питание как основная составляющая здорового образа жизни человека. *Международный журнал гуманитарных и естественных наук.* 2023;786(1–4):40–42. https://doi.org/10.24412/2500–1000–2023–1–4–40–42

Golubeva AN. Proper Nutrition as the Main Component of a Healthy Lifestyle. *International Journal of Humanities and Natural Sciences*. 2023;76(1–4):40–42. https://doi.org/10.24412/2500–1000–2023–1–4–40–42

5. Погожева А.В., Коденцова В.М., Шарафетдинов Х.Х. Роль магния и калия в профилактическом и лечебном питании. *Вопросы питания.* 2022;91(5):29–42. https://doi.org/10.33029/0042–8833–2022–91–5–29–42

Pogozheva AV, Kodentsova VM, Sharafetdinov KhKh. The Role of Magnesium and Potassium in Preventive and Therapeutic Nutrition. *Problems of Nutrition*. 2022;91(5):29–42. https://doi.org/10.33029/0042–8833–2022–91–5–29–42

6. Кочнева Е.В. Дефицит магния в клинической практике. *Вопросы диетологии.* 2018;8(1):37–51. https://doi.org/10.20953/2224–5448–2018–1–37–51

Kochneva EV. Magnesium Deficiency in Clinical Practice. *Nutrition*. 2018;8(1):37–51. https://doi.org/10.20953/2224–5448–2018–1–37–51

7. Евсеева Г.П., Супрун С.В., Супрун Е.Н., Ракицкая Е.В., Козлов В.К., Лебедько О.А. Влияние дисбаланса микроэлементов на иммунитет. *Микроэлементы в медицине.* 2021;22(S1):27–28. https://doi.org/10.19112/2413-6174-2021-S1-12

Evseeva GP, Suprun SV, Suprun EN, Rakitskaya EV, Kozlov VK, Lebed'ko OA. Influence of Trace Elements Imbalance on Immunity. *Trace Elements in Medicine*. 2021;22(S1):27–28. https://doi.org/10.19112/2413–6174–2021-S1–12

8. Hang Zhou, Bing Liang, Haitao Jiang, Zhongliang Deng, Kexiao Yu. Magnesium-Based Biomaterials as Emerging Agents for Bone Repair and Regeneration: From Mechanism to Application. *Journal of Magnesium and Alloys.* 2021;9(3): 779–804. URL: https://www.jmamg.com/uploadfiles/2024/04/20240407095328708.pdf (accessed: 25.06.2024).

9. Рубникович С.П., Хомич И.С. Костные трансплантаты и заменители для устранения дефектов и аугментации челюстных костей в имплантологии и периодонтологии. *Стоматолог.* 2014;1(12):77–86. URL: http://journal-stomatolog.by/wp-content/uploads/2018/05/2–13–2014.pdf (дата обращения: 25.06.2024).

Rubnikovich SP, Khomich IS. The Use of Bone Grafts and Bone Substitutes to Eliminate Defects and Augment Jaw Bones in Dental Implantology and Periodontology. *Dentist*. 2014;1(12):77–86. URL: http://journal-stomatolog.by/wp-content/uploads/2018/05/2–13–2014.pdf (accessed: 25.06.2024).

10. Монич С.Г., Храмкова А.С., Бондаренко В.А. Использование нанотехнологий в дентальной имплантологии. В: *Тр. 16-й Междунар. науч.-тех. конф. «Приборостроение-2023».* Минск: Белорусский национальный технический университет; 2023. С. 288–289. URL: https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/138532/288289.pdf?sequence=1&isAllowed=y&ysclid=lw7sq5m32n354587227 (дата обращения: 25.06.2024).

Monich SG, Khramkova AS, Bondarenko VA. The Use of Nanotechnology in Dental Implantology. In: *Proc. 16th International Science and Technology Conference "Instrumentation-2023"*. Minsk: BNTU Publ.; 2023. P. 288–289. (In Russ.) https://rep.bntu.by/handle/data/138532

11. Волова Л.Т., Трунин Д.А., Пономарева Ю.В., Попов Н.В. Исследование биосовместимости и цитотоксичности персонифицированных костных имплантатов с применением клеточных технологий. *Вестник медицинского института «Реавиз»: реабилитация, врач и здоровье.* 2017;29(5):32–39.

Volova LT, Trunin DA, Ponomareva YuV, Popov NV. Study of Biocompatibility and Cytotoxicity of Personalized Bone Implants Using Cell Technologies. *Bulletin of REAVIZ: Rehabilitation, Doctor, and Health*. 2017;29(5):32–39.

12. Kou Sh(G), Peters L, Mucalo M. Chitosan: A Review of Molecular Structure, Bioactivities and Interactions with the Human Body and Micro-Organisms. *Carbohydrate Polymers.* 2022;282:119132. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.119132

13. Wenjie Wang, Changhu Xue, Xiangzhao Mao. Chitosan: Structural Modification, Biological Activity and Application. *International Journal of Biological Macromolecules.* 2020;164:4532–4546. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.09.042

14. Блинов А.В., Пирогов М.А., Гвозденко А.А., Голик А.Б., Рехман З.А., Колодкин М.А. и др. Компьютерное квантово-химическое моделирование взаимодействия наночастиц селена с четвертичными аммониевыми соединениями. *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов.* 2023;15:357–366. https://doi.org/10.26456/pcascnn/2023.15.357

Blinov AV, Pirogov MA, Gvozdenko AA, Golik AB, Rekhman ZA, Kolodkin MA. Computer Quantum-Chemical Modeling of the Interaction of Selenium Nanoparticles with Quaternary Ammonium Compounds. *Physical and Chemical Aspects of the Study of Clusters, Nanostructures and Nanomaterials*. 2023;15:357–366. https://doi.org/10.26456/pcascnn/2023.15.357

15. Анисимов А.В. Планирование эксперимента как эффективный метод оптимизации технологического процесса. В: *Тр. Междунар. науч.-практ. конф. «Актуальные проблемы ветеринарной медицины, пищевых и биотехнологий»*. Саратов: Саратовский государственный аграрный университет им. Н.И. Вавилова; 2022. С. 249–252.

Anisimov AV. Experiment Planning as an Effective Method of Technological Process Optimization. In: *Proc. International Science and Technology Conference "Current Issues in Veterinary Medicine, Food and Biotechnology"*. Saratov: Saratov State Vavilov Agrarian University Publ.; 2022. P. 249–252. (In Russ.)

16. Frost RL. Raman Spectroscopic Study of the Magnesium Carbonate Mineral Hydromagnesite ($Mg_5[(CO_3)_4 OH)_2]\cdot 4H_2O$). *Journal of Raman Spectroscopy.* 2011;42(8):1690–1694. https://doi.org/10.1002/jrs.2917

17. Kornprobst T, Plank J. Synthesis and Properties of Magnesium Carbonate Xerogels and Aerogels. *Journal of Non-Crystalline Solids.* 2013;361:100–105. https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2012.10.023

18. Aksay S. Effects of Al Dopant on XRD, FT-IR and UV–vis Properties of MgO Films. *Physica B: Condensed Matter.* 2019;570:280–284. https://doi.org/10.1016/j.physb.2019.06.020

19. Apfelbaum F, Mayer I, Rey C, Lebugle A. Magnesium in Maturing Synthetic Apatite: A Fourier Transform Infrared Analysis. *Journal of Crystal Growth.* 1994;144(3-4):304–310. https://doi.org/10.1016/0022–0248(94)90471–5

20. Frost RL, Reddy BJ, Bahfenne S, Graham J. Mid-Infrared and Near-Infrared Spectroscopic Study of Selected Magnesium Carbonate Minerals Containing Ferric Iron – Implications for the Geosequestration of Greenhouse Gases. *Spectrochimica Acta. Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy.* 2009;72(3):597–604. https://doi.org/10.1016/j.saa.2008.10.043

21. Zawadzki J, Kaczmarek H. Thermal Treatment of Chitosan in Various Conditions. *Carbohydrate Polymers.* 2010;80(2):394–400. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2009.11.037

22. Silva SML, Braga CRC, Fook MVL, Raposo CMO, Carvalho LH, Canedo EL. Application of infrared spectroscopy to analysis of chitosan/clay nanocomposites. In book: Th Theophanides (ed). *Infrared Spectroscopy — Materials Science, Engineering and Technology.* Ch. 3. London: IntechOpen Publ.; 2012. P. 43–62. http://doi.org/10.13140/2.1.3806.5609

Об авторах:

Андрей Владимирович Блинов, кандидат технических наук, заведующий кафедрой физики и технологии наноструктур и материалов Северо-Кавказского федерального университета (355017, Российская Федерация, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1), SPIN-код, ORCID, ScopusID, blinov.a@mail.ru

Зафар Абдулович Рехман, ассистент кафедры физики и технологии наноструктур и материалов Северо-Кавказского федерального университета (355017, Российская Федерация, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1), SPIN-код, ORCID, ScopusID, zafrehman1027@gmail.com

Алексей Алексеевич Гвозденко, ассистент кафедры физики и технологии наноструктур и материалов Северо-Кавказского федерального университета (355017, Российская Федерация, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1), SPIN-код, ORCID, ScopusID, ResearcherID, gvozdenko.1999a@gmail.com

Мария Анатольевна Ясная, кандидат химических наук, доцент кафедры физики и технологии наноструктур и материалов Северо-Кавказского федерального университета (355017, Российская Федерация, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1), SPIN-код, ORCID, ScopusID, ResearcherID, iasnaia@ncfu.ru

Максим Андреевич Колодкин, заведующий лабораторным комплексом кафедры физики и технологии наноструктур и материалов Северо-Кавказского федерального университета (355017, Российская Федерация, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1) SPIN-код, mkolodkin@ncfu.ru

Максим Александрович Тараванов, лаборант кафедры физики и технологии наноструктур и материалов Северо-Кавказского федерального университета (355017, Российская Федерация, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1), SPIN-код, ORCID, ScopusID, ResearcherID, pronapro82@gmail.com

Заявленный вклад авторов:
А.В. Блинов: разработка концепции.
З.А. Рехман: написание рукописи — рецензирование и редактирование.
А.А. Гвозденко: валидация результатов.
М.А. Ясная: разработка методологии.
М.А. Колодкин: формальный анализ.
М.А. Тараванов: проведение исследования.

Конфликт интересов: **авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Andrey V. Blinov, Cand.Sci. (Eng.), Head of the Department of Physics and Technology of Nanostructures and Materials, North-Caucasus Federal University (1, Pushkin Str., Stavropol, 355017, Russian Federation), SPIN-code, ORCID, ScopusID, blinov.a@mail.ru

Zafar A. Rekhman, Teaching Assistant of the Department of Physics and Technology of Nanostructures and Materials, North-Caucasus Federal University (1, Pushkin Str., Stavropol, 355017, Russian Federation), SPIN-code, ORCID, ScopusID, zafrehman1027@gmail.com

Alexey A. Gvozdenko, Teaching Assistant of the Department of Physics and Technology of Nanostructures and Materials, North-Caucasus Federal University (1, Pushkin Str., Stavropol, 355017, Russian Federation), SPIN-code, ORCID, ScopusID, ResearcherID, gvozdenko.1999a@gmail.com

Maria A. Yasnaya, Cand.Sci. (Chemistry), Associate Professor, the Department of Physics and Technology of Nanostructures and Materials, North-Caucasus Federal University (1, Pushkin Str., Stavropol, 355017, Russian Federation), SPIN-code, ORCID, ScopusID, ResearcherID, iasnaia@ncfu.ru

Maxim A. Kolodkin, Head of the Laboratory Complex of the Department of Physics and Technology of Nanostructures and Materials, North-Caucasus Federal University (1, Pushkin Str., Stavropol, 355017, Russian Federation), SPIN-code, mkolodkin@ncfu.ru

Maxim A. Taravanov, Assistant of the Department of Physics and Technology of Nanostructures and Materials, North-Caucasus Federal University (1, Pushkin Str., Stavropol, 355017, Russian Federation), SPIN-code, ORCID, ScopusID, ResearcherID, pronapro82@gmail.com

Claimed Contributorship:
AV Blinov: conceptualization.
ZA Rekhman: writing — review and editing.
AA Gvozdenko: validation.
MA Yasnaya: methodology.
MA Kolodkin: formal analysis.
MA Taravanov: investigation.

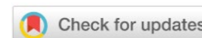
Conflict of Interest Statement: **the authors declare no conflict of interest.**

All the authors have read and approved the final version of the manuscript.

Поступила в редакцию / Received 09.10.2024
Поступила после рецензирования / Reviewed 29.10.2024
Принята к публикации / Accepted 07.11.2024

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE





УДК 621.791.927.5
https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-4-402-412

Оригинальное теоретическое исследование

Выбор процесса дуговой наплавки плавящимся электродом в защитном газе уплотнительных поверхностей энергетической арматуры



EDN: TKWDZL

Д.В. Рогозин ✉, **В.А. Ленивкин**
Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация
✉ dmrogozin@ya.ru

Аннотация

Введение. Одно из главных требований к способам наплавки уплотнительных поверхностей деталей затвора энергетической арматуры заключается в получении качественного износостойкого наплавленного слоя металла при минимальном его проплавлении и оптимальной производительности процесса. В настоящее время разработаны и внедрены в производство дуговые, электрошлаковые, плазменные, лучевые, индукционные и другие способы наплавки. Однако влияние различных дуговых сварочных процессов плавящимся электродом в защитном газе на геометрические параметры наплавленных валиков и твердость металла уплотнительных поверхностей недостаточно изучено. Представленная научная работа призвана восполнить этот пробел. Целью ее авторов является выбор такого процесса дуговой наплавки валиков плавящимся электродом в защитных газах на детали затвора энергетической арматуры, который обеспечивал бы наилучшие сварочно-технологические свойства наплавленного металла.

Материалы и методы. Дуговую наплавку плавящимся электродом в смеси газов осуществляли на пластины из стали. Наплавочная горелка перемещалась прямолинейно, без поперечных колебаний, с помощью механизма FRC-9 (Fronius). В качестве источника питания использовали цифровой источник тока инверторного типа с микропроцессорным управлением TransPulsSynergic 3200 CMT (Fronius). Анализу подвергались следующие сварочные процессы: процесс *MIG/MAG* с саморегулированием (режим Standard), синергетический процесс способа *MIG/MAG* (режим Synergic), процесс короткой дугой с механическим отрывом капель электродного металла (CMT-ColdMetalTransfer) и синергетический импульсно-дуговой процесс (PulseSynergic). Рациональный процесс наплавки валиков оценивался стабильностью величин энергетических параметров режима наплавки валиков во времени при одинаковых скоростях подачи электродной проволоки, которые фиксировались осциллографами, а также сравнение геометрических характеристик наплавленных валиков и твердости наплавленного металла.

Результаты исследования. Анализ экспериментальных данных геометрических размеров наплавленных валиков и их комплексных размерных характеристик позволил установить, что сварочно-технологическим требованиям, предъявляемым к наплавляемым валикам, наиболее полно соответствует наплавка длинной дугой импульсно-дуговым процессом *PulseSynergic.*

Обсуждение и заключение. Проведенное исследование и полученные в результате его данные вносят определенный вклад в решение проблемы влияния дуговых сварочных процессов на параметры наплавленных валиков и на твердость металла уплотнительных поверхностей. Подробный анализ режимов дуговой наплавки валиков плавящимся электродом в защитных газах на детали затвора энергетической арматуры может быть использован в дальнейших исследованиях на эту тему. Выводы авторов не только окажут ощутимую теоретическую помощь ученым, но и внесут коррективы в деятельность специалистов-практиков.

Ключевые слова: импульсно-дуговая наплавка, сварочные процессы, короткая дуга, длинная дуга, плавящийся электрод, уплотнительные поверхности

Благодарности. Авторы выражают благодарность редакции и рецензентам за внимательное отношение к статье и замечания, которые позволили повысить ее качество.

Для цитирования. Рогозин Д.В., Ленивкин В.А. Выбор процесса дуговой наплавки плавящимся электродом в защитном газе уплотнительных поверхностей энергетической арматуры. *Advanced Engineering Research* (*Rostov-on-Don*). 2024;24(4):402–412. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-4-402-412

Original Theoretical Research

Selection of the Process of Arc Welding of Sealing Surfaces of Power Valves with a Consumable Electrode in the Shielding Gas

Dmitrii V. Rogozin ✉, **Vyacheslav A. Lenivkin**
Don State Technological University, Rostov-on-Don, Russian Federation
✉ dmrogozin@ya.ru

Abstract
Introduction. One of the main requirements to the methods of weld overlay of sealing surfaces of power valve trim parts is to obtain a high-quality wear-resistant pad with minimal penetration and optimal process performance. Currently, arc, electroslag, plasma, beam, induction and other surfacing techniques have been developed and introduced into production. However, the influence of various arc welding processes with a consumable electrode in shielding gas on the geometric parameters of weld beads and metal hardness of sealing surfaces is understudied. The presented research is intended to fill this gap. The objective of its authors is to select such a process of arc welding of beads on parts of the power valve trim with a consumable electrode in shielding gases, which would provide the best workability of the deposited metal.
Materials and Methods. Arc surfacing with a consumable electrode in a mixture of gases was performed on steel plates. The welding torch was moved in a straight line, without transverse oscillations, using the FRC-9 mechanism (Fronius). A microprocessor-controlled inverter-type digital current source TransPulsSynergic 3200 CMT (Fronius) was used as the power supply. The following welding processes were analyzed: MIG/MAG process with self-regulation (Standard mode), synergic process of MIG/MAG method (Synergic mode), short arc process with mechanical separation of electrode metal droplets (CMT-ColdMetalTransfer), and synergic pulse-arc process (PulseSynergic). The short-cut process of bead surfacing was evaluated by the stability of the values of the energy parameters of the bead surfacing mode in time at the same electrode wire feed rates, which were recorded by oscilloscopes, as well as by comparing the geometric characteristics of the deposited beads and the hardness of the deposited metal.
Results. The analysis of experimental data of the geometrics of the weld beads and their complex dimensional characteristics made it possible to establish that the welding engineering requirements for the welded beads are most fully met by long-arc surfacing by the PulseSynergic pulse-arc process.
Discussion and Conclusion. The study and the resulting data make a certain contribution to solving the problem of the influence of arc welding processes on the parameters of weld beads and on the hardness of the metal of sealing surfaces. A detailed analysis of the modes of arc surfacing of beads with a consumable electrode in shielding gases on the trim parts of power valves can be used in further research on this topic. The conclusions of the authors will not only provide considerable theoretical assistance to scientists, but will also make adjustments to the activities of practitioners.

Keywords: pulse arc surfacing, welding processes, short arc, long arc, consumable electrode, sealing surfaces

Acknowledgements. The authors would like to thank the Editorial board and the reviewers for their attentive attitude to the article and for the specified comments that improved the quality of the article.

For citation. Rogozin DV, Lenivkin VA. Selection of the Process of Arc Welding of Sealing Surfaces of Power Valves with a Consumable Electrode in the Shielding Gas. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2024;24(4):402–412. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-4-402-412

Введение. Одним из главных результатов процесса механизированной наплавки в защитных газах уплотнительных поверхностей деталей затвора энергетической арматуры является получение качественного износостойкого наплавленного слоя металла при минимальном его проплавлении [1]. Требования, предъявляемые к металлу наплавленного слоя, разделяют на три группы: сварочно-технологические, эксплуатационные и экономические [2].

Сварочно-технологические требования обусловливают отсутствие пор, трещин, участков с охрупченной структурой и других сварочных дефектов, возникающих при наплавке. Наплавленный металл должен легко формироваться, иметь хорошую отделимость шлака в широком диапазоне режимов как при однослойной, так и многослойной наплавке. Коэффициенты термического расширения основного и наплавленного металла должны быть соизмеримы. В противном случае возможно образование холодных трещин в зоне сплавления с последующим отслаиванием наплавленного металла. Содержание различных элементов в наплавленном металле определяет его структуру, фазовый состав, твердость и износостойкость [3].

К группе сварочно-технологических требований относится и производительность дуговой наплавки в защитных газах, которая колеблется до 8 кг/ч, а толщина слоя — до 10 и более миллиметров. Достичь большой производительности можно, применяя более мощные источники теплоты. Однако при нагреве больше определённой величины в наплавленном металле увеличивается доля основного металла, происходит переход из него вредных элементов, увеличивается объём жидкого металла и укрупняется первичная структура наплавленного металла [4]. В ряде случаев замедленное охлаждение наплавленного слоя и его отпуск снижают износостойкость и другие качественные показатели металла наплавленного слоя. Часто возникают противоречия между возможностью повысить производительность наплавки за счет увеличения мощности источника нагрева и качеством наплавленного слоя [5]. Поэтому технологические факторы, обусловленные способом и режимом наплавки, оказывают влияние на размеры и распределение структурных составляющих в наплавленном металле, на его прочность и качество.

Сварочно-технологические свойства наплавляемого валика определяются разновидностью процесса наплавки. Одним из основных свойств наплавленного металла уплотнительных поверхностей энергетической арматуры является его твёрдость [6]. Для формирования уплотнительных поверхностей на детали затвора энергетической арматуры в настоящее время широко применяются дуговые, электрошлаковые, плазменные, лучевые, индукционные и другие способы наплавки [7, 8]. Эффективным способом наплавки и достаточно исследованным является дуговая наплавка плавящимся электродом в защитных газах [9, 10].

Итогом интенсивной разработки силовых полупроводниковых приборов (силовых транзисторов) в последние десятилетия прошлого столетия стало создание новых современных сварочных малоинерционных, с высоким быстродействием источников питания (сварочных выпрямителей), оснащенных инверторными преобразователями, способными управлять режимами процесса на уровне микроциклов, что значительно расширяет область использования дуговой сварки и наплавки за счет возможности на аппаратном уровне реализовать специальные сварочные процессы короткой и длинной дугой [11]. Однако влияние различных дуговых сварочных процессов плавящимся электродом в защитном газе на геометрические параметры наплавленных валиков и твердость наплавленного металла недостаточно изучены. В связи с этим цель данной работы — определение процесса дуговой наплавки валиков плавящимся электродом в защитных газах на детали затвора энергетической арматуры, который обеспечивал бы наилучшие сварочно-технологические свойства наплавленного металла.

Материалы и методы. Влияние различных дуговых сварочных процессов, производимое плавящимся электродом в защитных газах на геометрические размеры валиков и на твёрдость металла наплавляемых поверхностей, исследовали при механизированной наплавке током обратной полярности отдельных прямолинейных валиков на пластины (из стали 20 ГОСТ 1050 толщиной 10 мм, длиной 300 мм и шириной 150 мм) электродной проволокой Св-08Г2С диаметром 1,2 мм в смеси защитных газов (82 % Ar + 18 % CO_2). Расход защитного газа — 13–15 л/мин, без поперечных колебаний сварочной горелки. Расстояние между торцом токоподводящего наконечника и поверхностью наплавляемой пластины выдерживалось постоянным — 20 мм.

Наплавляемые валики располагались параллельно на расстоянии не менее 20 мм друг от друга. Каждый последующий валик наплавляли после тщательной зачистки предыдущего от шлака. Температура металла предыдущего валика была не больше 100 °С.

Скорость наплавки составляла 30 см/мин (18 м/ч) и обеспечивалась механизмом перемещения наплавочной горелки FRC-9 (Fronius).

Регистрацию электрических параметров во время всего процесса наплавки валика (величину тока и падение напряжения на межэлектродном промежутке) производили измерителем-регистратором сварочных процессов ИРСП-11. Чтение и просмотр результатов регистрации в виде осциллограмм осуществляли на персональном компьютере с помощью программного обеспечения IRSP_Read.

Твердость наплавленного металла измеряли по ГОСТ 6996 на образцах в поперечном сечении после их полировки и травления в 4-процентном спиртовом растворе азотной кислоты по Роквеллу (HRC) на твердомере «Метротест ИТБРВ-187,5-М». Величина твердости определялось как среднее арифметическое в трех точках.

Для наплавки валиков использовался цифровой источник тока инверторного типа с микропроцессорным управлением TransPulsSynergic 3200 CMT (Fronius), который имеет достаточное количество синергетических программ управления электрическими параметрами режима сварки и обеспечивает четыре разновидности процесса наплавки:

– процесс *MIG/MAG* (режим *Standard*);

– синергетический процесс способа *MIG/MAG* (режим *Synergic*);

– процесс *CMT* с системой гибкого программного управления переносом «холодного металла» короткой дугой (режим *CMT*);

– процесс импульсно-дуговой (режим *PulseSynergic*).

Рациональный процесс наплавки валиков оценивался стабильностью величин энергетических параметров режима наплавки валиков во времени при одинаковых скоростях подачи электродной проволоки, которые фиксировались осциллограммами (рис. 1–4), результаты приведены в таблицах 1–3.

Результаты исследования. Энергетическими параметрами режима наплавки являются:

– средняя величина тока процесса наплавки ($I_{ср}$);

– падение напряжения на межэлектродном промежутке ($U_{пр}$).

Для наплавки короткой дугой:

– кривая тока короткого замыкания $i_{кз}(t_{кз})$;

– кривая тока горения дуги $i_{гд}(t_{гд})$;

– величина пикового тока ($I_{п}$), ток разрыва жидкой перемычки между каплей, погруженной в наплавляемую ванну, и электродом;

– длительность короткого замыкания $t_{кз}$, горения дуги $t_{гд}$ и всего цикла $t_{ц}$;

– частота коротких замыканий $f_{кз}$.

Процесс *MIG/MAG* (режим *Standard*) дуговой наплавки осуществлялся с постоянной скоростью подачи электродной проволоки $v_{пп}$ (в дальнейшем — электрод) с саморегулированием ее плавления, без применения регулирующих устройств длинной дугой (без коротких замыканий) в инертном, активном защитном газе и их смеси, короткой дугой (с замыканиями междугового промежутка). Параметры режима наплавки процессом *MIG/MAG* указаны в таблице 1 (режимы 1–3). Участок осциллограммы процесса *MIG/MAG* (режим *Standard*) показан на рис. 1.

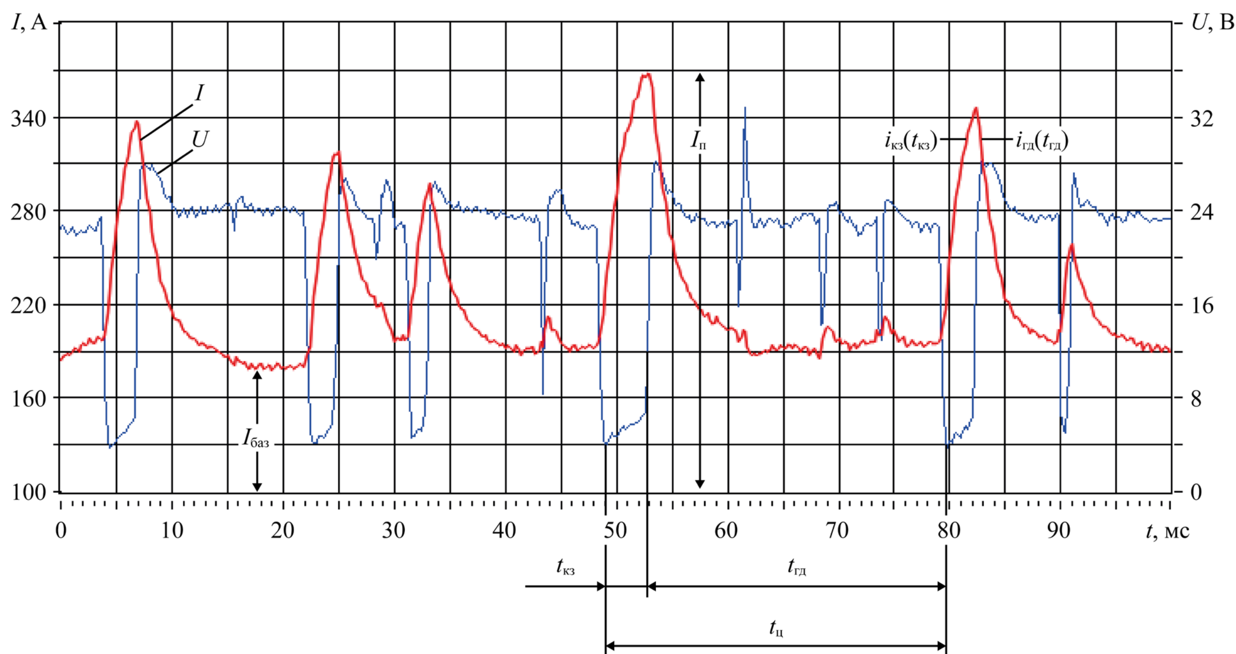


Рис. 1. Осциллограмма процесса *MIG/MAG* (режим *Standard*): режим наплавки 2 в таблице 1

Таблица 1

Параметры режимов наплавки процессом *MIG/MAG* и *MIG/MAG* (режим *Synergic)*

№ режима	$v_{пп}$, м/мин	Величина тока процесса, А			Напряжение, В	Длительность, мс			Частота коротких замыканий, 1/с
		$I_{ср}$	$I_{баз}$	$I_{п}$	$U_{пр}$	$t_{кз}$	$t_{гд}$	$t_{ц}$	$f_{кз}$
1	5,0	$\frac{188-198}{194}$	$\frac{130-190}{160}$	$\frac{190-310}{250}$	19	$\frac{2-4}{3}$	$\frac{4-24}{14}$	$\frac{6-28}{17}$	59
2	6,5	$\frac{220-230}{225}$	$\frac{190-210}{190}$	$\frac{250-360}{310}$	21	$\frac{2-4}{3}$	$\frac{5-26}{15}$	$\frac{7-30}{18}$	51
3	8,0	$\frac{252-263}{256}$	$\frac{235-245}{240}$	$\frac{300-380}{340}$	25	$\frac{2-4}{3}$	$\frac{25-65}{45}$	$\frac{27-69}{48}$	21

4	5,0	188 – 201 / 193	140 – 180 / 160	220 – 260 / 240	19	2 – 6 / 3	2 – 29 / 16	4 – 35 / 19	52
5	6,5	223 – 240 / 234	160 – 220 / 190	280 – 310 / 290	19	3 – 8 / 5	8 – 38 / 23	11 – 46 / 28	35
6	8,0	254 – 265 / 258	220 – 260 / 240	300 – 320 / 310	24	2 – 6 / 4	6 – 46 / 26	8 – 52 / 30	33

Примечание. В числителе указаны наименьшие и наибольшие величины электрических и временных параметров процессов наплавки. В знаменателе — средняя величина соответствующих параметров за время наплавки валика.

Синергетический процесс способа *MIG/MAG* (режим *Synergic*) — самоорганизующаяся система, автоматически меняющая свою структуру управления процессом путём выбора необходимой синергетической программы. В режиме *Synergic* настройка одного параметра режима наплавки приводит к автоматическому изменению всех остальных параметров процесса путём перехода на новую программу, обеспечивающую стабильный процесс наплавки (таблица 1, режимы 4–6).Участок осциллограммы синергетического процесса способа *MIG/MAG* (режим *Synergic*) показан на рис. 2.

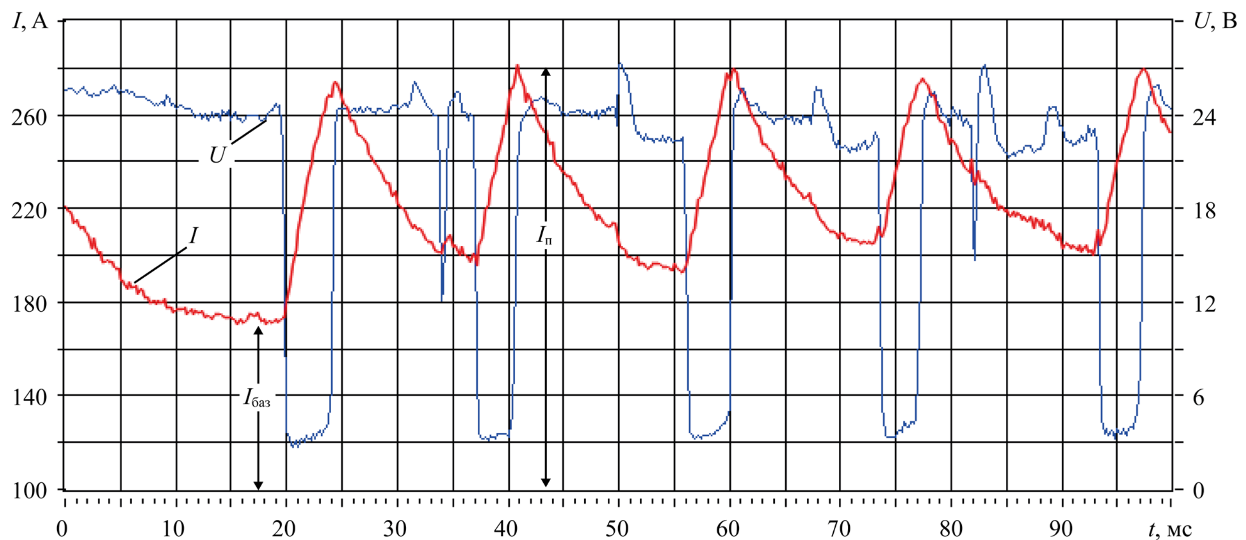


Рис. 2. Осциллограмма синергетического процесса способа *MIG/MAG* (режим *Synergic*): параметры режима наплавки 5 в таблице 2

При наплавке короткой дугой способом *MIG/MAG* (режим *Standard*) и при синергетическом процессе способа *MIG/MAG* (режим *Synergic*) ток во время короткого замыкания увеличивается (кривая тока короткого замыкания $i_{кз}(t_{кз})$) по экспоненциальному закону, а при разрыве перемычки ток горения дуги (кривая тока горения дуги $i_{гд}(t_{гд})$) уменьшается тоже по экспоненциальному закону, как и при наплавке от параметрических сварочных выпрямителей, у которых отсутствует инверторный преобразователь [12, 13].

Надёжный разрыв перемычки в указанных процессах наплавки происходит при определённом запасе по току $I_п \leq 0{,}7I_0$, где $I_п$ — величина пикового тока в момент разрыва жидкой перемычки между торцом электрода и наплавляемой ванной; $I_0 = U_{xx} / Z_ц$ — установившийся ток короткого замыкания; U_{xx} — напряжение на выходе источника питания; $Z_ц$ — комплексное электрическое сопротивление наплавочной цепи [12].

Известно, что характер течения процесса с частыми короткими замыканиями дугового промежутка зависит от скорости нарастания тока в начале короткого замыкания $i_{кз}(t_{кз})$ и при разрыве жидкой перемычки $i_{гд}(t_{гд})$ [14].

По данным [14], при наплавке электродом диаметром 1,2 от сварочных выпрямителей, в которых отсутствуют инверторные преобразователи, при большой скорости нарастания тока, $i_{кз}$ > 200–300 кА/с, процесс стабилен, но сопровождается повышенным разбрызгиванием. При малых скоростях нарастания тока, $i_{кз}$ < 40 кА/с, процесс протекает с редкими короткими замыканиями, нестабильно. При скоростях 40–130 кА/с процесс протекает стабильно, с небольшим разбрызгиванием.

Сварочные источники питания с инверторными преобразователями комплектуются понижающими выходными трансформаторами с небольшой индуктивностью, которые обеспечивают малую инерционность источника и постоянную времени цепи. Малая длительность постоянной времени электрической цепи обеспечивает большую скорость нарастания тока в момент соприкасания жидкого металла электрода с наплавочной ванной. Это должно ухудшать надёжное замыкание межэлектродного промежутка и способствовать увеличению потерь металла на разбрызгивание из ванны и торца электрода за счёт увеличения аксиальной составляющей электродинамических сил, действующих на металл капли, находящийся на торце электрода и сварочной ванны.

В данной работе при наплавке валиков процессами на режимах, указанных в таблицах 1 и 2, с короткими замыканиями дугового промежутка от источника инверторного типа со скоростью подачи электрода ($v_{пп}$) 6,5 м/мин определено, что скорость нарастания тока в начале короткого замыкания при процессе *MIG/MAG* (режим *Standard*) составляет 40–45 кА/с, при режиме *Synergic* — 20–25 кА/с, при режиме *CMT* — 25–30 кА/с.

Результаты обработки данных осциллограмм, приведенных в таблице 1 (режимы 1–6), показывают, что процессы наплавки *MIG/MAG*с короткими замыканиями (режим *Standard* и режим *Synergic*) являются нестабильными как по электрическим, так и по временным параметрам. Это способствует образованию капель неравномерных размеров и неравномерной частоте их переноса. Данное обстоятельство является причиной неудовлетворительного формирования поверхности наплавляемого валика, которое проявляется в неравномерном бугристом очертании его поверхности — чешуйчатости.

Управление процессом наплавки в системе *CMT* осуществляется одновременно сигналами обратной связи по мгновенной величине сварочного тока и напряжению на различных этапах короткого замыкания дугового промежутка путём воздействия на малоинерционный сварочный источник питания и на скорость подачи электрода.

В подающем устройстве *CMT* применена «толкающая — тянущая» система подачи электрода. Более мощный толкающий двигатель постоянного тока подаёт электродную проволоку с кассеты в гибкий шланг с постоянной скоростью, равной средней скорости её плавления. Тянущий реверсивный серводвигатель, установленный в корпусе горелки, обеспечивает по заданной программе возвратно-поступательное перемещение электродной проволоки при выходе из токоподводящего наконечника сварочной горелки с переменной скоростью.

Характер изменения электрических параметров процесса по алгоритму *CMT* при скорости подачи электрода 6,5 м/мин показан на рис. 3.

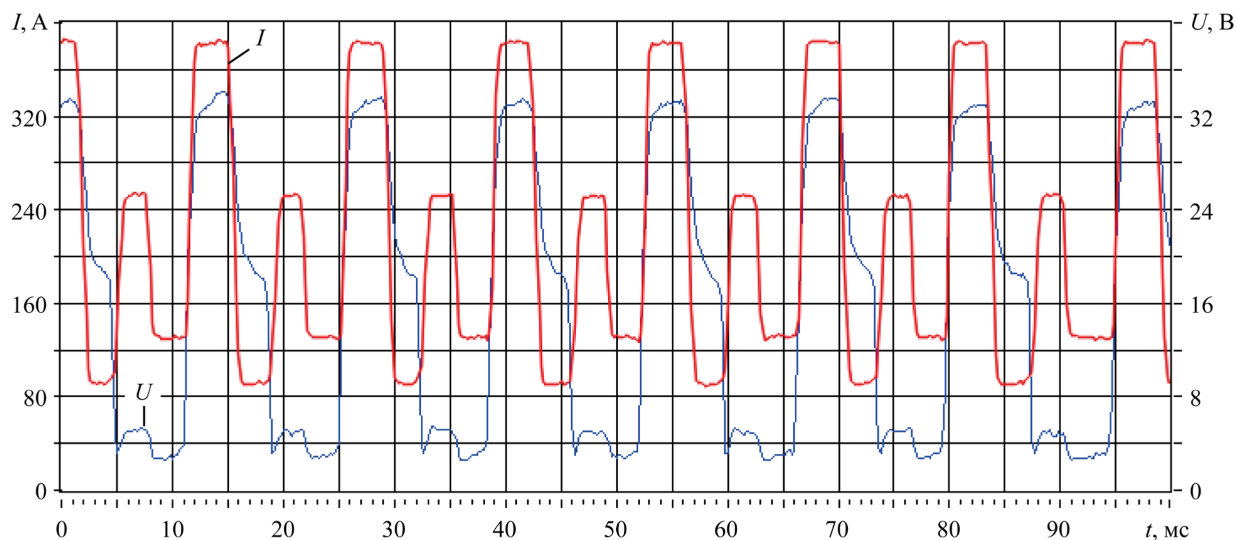


Рис. 3. Осциллограмма процесса *CMT*: параметры режима наплавки 8 в таблице 2

Таблица 2

Параметры режимов наплавки процессом СМТ

№ режима	Скорость подачи, $v_{пп}$, м/мин	Величина тока, А			Напряжение, В	Длительность, мс			Частота коротких замыканий, 1/с	Объем капли
		$I_{ср}$	$I_{баз}$	$I_{п}$	$U_{пр}$	$t_{кз}$	$t_{гд}$	$t_{ц}$	$f_{кз}$	мм^3
7	5,0	175	240	300	14	5	6	11	90	1,72
8	6,5	220	250	380	16	6	7	13	77	1,54

С целью объяснения технологических преимуществ процесса наплавки *CMT* рассмотрена особенность изменения электрических параметров алгоритма за один цикл (рис. 4), взятый из осциллограммы на рис. 3.

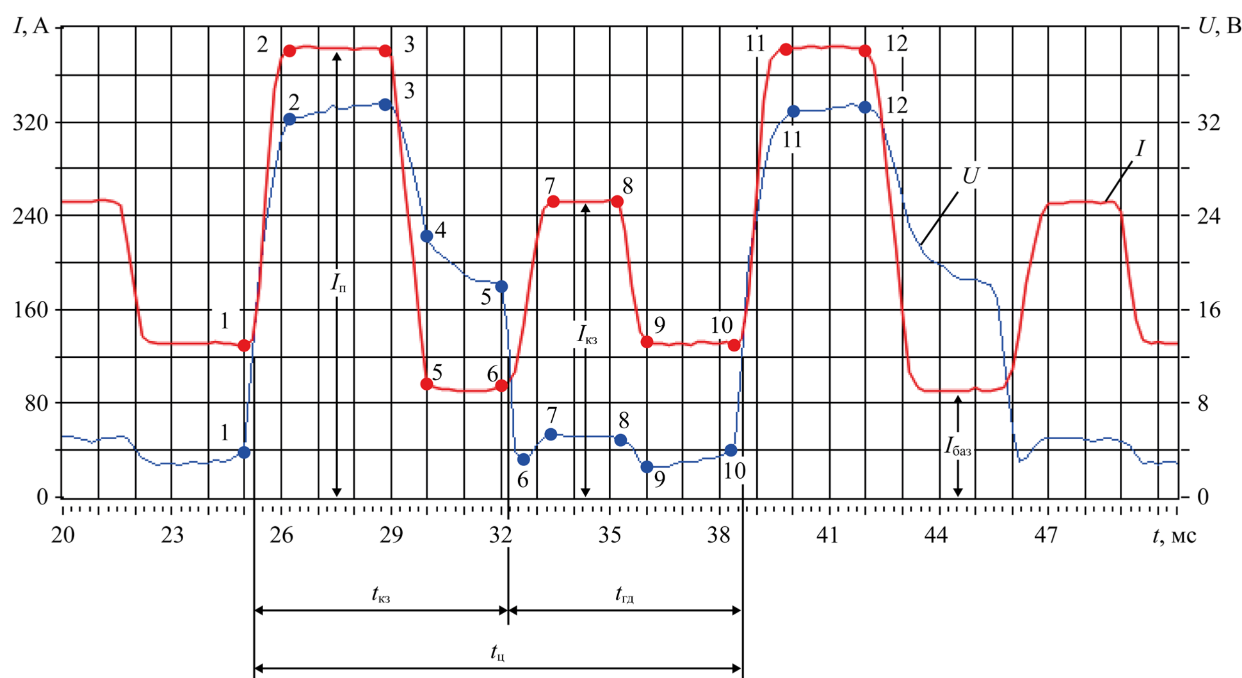


Рис. 4. Фрагмент одного цикла из осциллограммы процесса *CMT*: параметры режима — на рис. 3

Из фрагмента осциллограммы одного цикла (рис. 4) следует, что в точках (т.) 1 начинает происходить процесс разрыва перемычки на относительно малом токе (135 А). Это намного меньше, чем при процессе *MIG/MAG*. Падение напряжения на межэлектродном промежутке за 0,25 мс увеличивается до суммы приэлектродных падений напряжения, а затем, через 0,75 мс, увеличивается до 32 В (т. 2), а ток увеличивается до 380 А (т. 2) со скоростью его нарастания 250 кА/с.

Металл электродной проволоки, расплавленный за время горения дуги в интервале времени между т. 1 и т. 3 (около 4 мс) на относительно большой величине тока, вытесняется с торца электрода на его боковую поверхность. Затем в течение 1,0 мс ток резко уменьшается до величины базового тока ($I_{баз}$ — 90 А) со скоростью 290 кА/с, а напряжение снижается до 23 В. В промежутке времени 2,0 мс (между т. 4 и т. 5) длина дугового промежутка сокращается, а напряжение уменьшается до 18 В. Величина базового тока между т. 4 и т. 5 системой управления источником автоматически поддерживается постоянной, расплавленный металл с боковой поверхности электрода спускается под его торец, принимает форму шарообразного сегмента.

При соприкосновении жидкого металла шарообразного сегмента электрода с поверхностью наплавочной ванны (т. 6 на кривой напряжения) происходит надежное короткое замыкание электрической цепи без разбрызгивания, которое наблюдается при *MIG/MAG* наплавке, в течение 1 мс, и в течение 2 мс (между т. 7 и т. 8) падение напряжения на нем выдерживаются постоянным (5 В), величина тока — 250 А соответственно.

В т. 8 производится реверс серводвигателя, и электрод начинает перемещаться в противоположную сторону от наплавочной ванны. Величина тока уменьшается до 130 А (т. 9), и в течение 2,5 мс (интервал между т. 9 и т. 10) остается неизменным, а напряжение на перемычке увеличивается на 1 В. При этом перемычка продолжает вытягиваться из ванны и сужаться.

В т. 10 перемычка разрывается, напряжение на дуговом промежутке становится больше суммы ее при электродных падениях, и дуга зажигается. Одновременно производится реверс серводвигателя, и электрод начинает подаваться в сторону наплавочной ванны с увеличенной скоростью. Одновременно увеличивается напряжение на дуговом промежутке между т. 10 и т. 11. Это приводит к большой скорости нарастания тока (480 кА/с) до величины в 380 А. В промежутке времени между т. 11 и т. 12 происходит интенсивное плавление электрода, и цикл процесса наплавки повторяется.

Из данных осциллограммы (рис. 3 и таблица 2) следует, что процесс *CMT* наиболее стабильный, так как в нём практически отсутствуют отклонения — как по электрическим, так и временным параметрам.

При наплавке валика процессом *CMT* (рис. 3) величина тока во время короткого замыкания дугового промежутка, по сравнению с процессом *MIG/MAG,* при одинаковой скорости подачи электрода меньше, а процесс

более стабильный и имеет ярко выраженный циклический характер. Частота коротких замыканий больше, а длительность горения дуги и время цикла меньше (таблица 2). Это способствует более мелкому переносу металла, удовлетворительному формированию поверхности наплавляемого валика с равномерной чешуйчатостью.

В процессе импульсной наплавки (*PulseSynergic)* наряду с использованием самого процесса *Synergic* возможно цикличное чередование энергетических параметров процесса наплавки. Благодаря такому импульсному изменению тока процесса и напряжения дуги регулируется тепловложение в наплавленной ванне, что, в свою очередь, сказывается на геометрии наплавленного валика.

Основной задачей импульсно-дуговой наплавки (сварки) плавящимся электродом длинной дугой является обеспечение управляемого мелкокапельного переноса металла в области режимов с естественным крупнокапельным переносом. Наилучшие технологические свойства этого процесса проявляются при использовании пространственно-устойчивых дуг, которые наблюдаются в защитной среде аргона или в смеси с более 80 % *Ar и* CO_2.

Участок осциллограммы процесса наплавки режимом *PulseSynergic* показана рис. 5, параметры процесса импульсной наплавки при различных скоростях подачи электрода приведены в таблице 3, а параметры валиков — в таблице 4 (режимы 9–11).

Импульс тока имеет трапецеидальную форму, величина амплитуды которой определяется как $I_и = I_п – I_{баз}$.

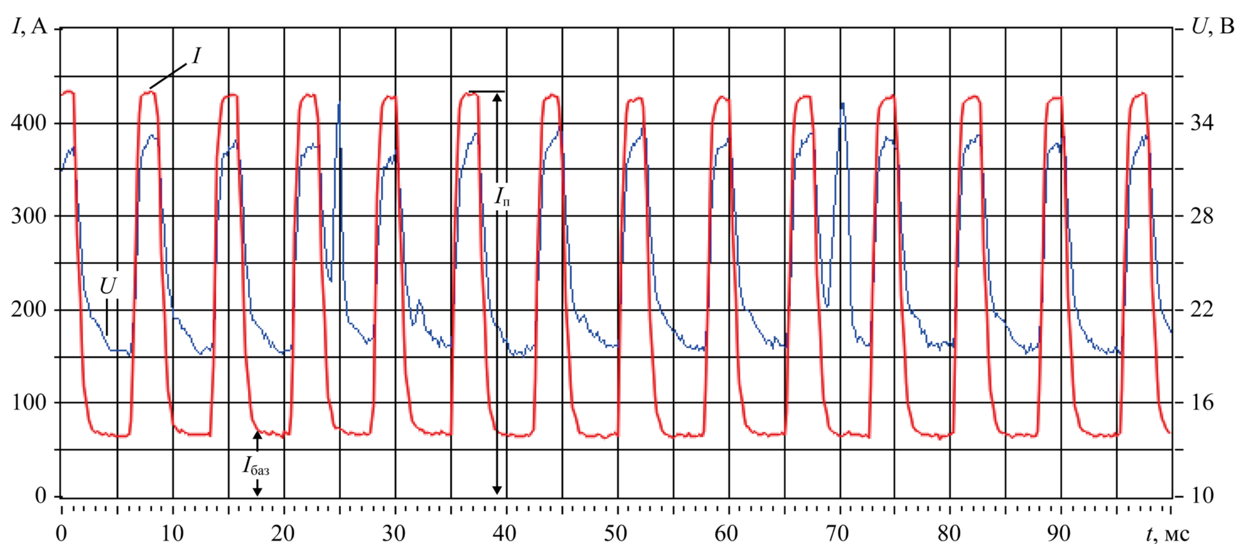


Рис. 5. Осциллограмма импульсно-дугового процесса (режим *PulseSynergic*): параметр режима наплавки 10 в таблице 3

Таблица 3

Параметры режимов наплавки процессом *PulseSynergic*

№ режима	Скорость подачи, $v_{пп}$, м/мин	Величина тока процесса, А			Напряжение, В	Длительность, мс			Частота импульсов тока, 1/с	Объем капли, мм^3
		$I_{ср}$	$I_{баз}$	$I_п$	$U_п$	$t_{ИМ}$	$t_п$	$t_ц$	$f_{ИМП}$	
9	5,0	157	45	430	24	3	7	10	100	1,19
10	6,5	192	70	430	24	3	5	8	125	1,11
11	8,0	233	100	430	26	3	3	6	166	1,15

Особенность алгоритма управления процессом наплавки режима *PulseSynergic* заключается в том, что средний ток процесса ($I_{ср}$) и его базовый ток ($I_{баз}$) устанавливаются скоростью подачи электрода, а их величины с увеличением скорости подачи электрода возрастают. При этом пиковый ток импульса ($I_п$) и его длительность ($t_{ИМ}$) остаются неизменными, а длительность паузы ($t_п$) сокращается с одновременным увеличением частоты следования импульсов ($f_{ИМП}$), объём капель остаётся практически одинаковым, мелкокапельным (таблица 3). В таких условиях поверхность наплавляемого валика имеет мелкую равномерную чешуйчатость.

Таблица 4

Параметры валиков, наплавленных различными процессами

№ режима	Процесс наплавки	Глубина проплавления, *a*, мм	Ширина валика, *e*, мм	Высота выпуклости, *g*, мм	Площадь проплавления, мм^2	Площадь наплавки, мм^2 (расчёт)	Коэффициент формы наплавки	Коэффициент формы проплавления	Твердость HRC
1	*MIG/MAG*	2,4	8,8	3,2	10,0	20,0	2,8	3,7	21,0
2		3,0	10,7	3,2	15,0	24,5	3,3	3,6	24,0
3		3,3	14,5	2,9	21,0	29,4	5,0	4,4	18,5
4	*Synergic*	2,3	9,2	2,9	9,2	18,2	3,2	4,0	29,0
5		1,2	10,1	3,6	4,0	26,0	2,8	8,4	24,0
6		4,0	14,4	3,0	22,0	30,0	4,8	3,6	19,0
7	*CMT*	1,5	7,0	3,7	3,8	20,3	1,9	4,7	25,0
8		2,2	10,2	3,7	7,0	27,8	2,8	4,6	24,5
9	*Pulse Synergic*	2,3	11,4	2,6	10,4	20,0	4,4	5,0	20,0
10		3,2	12,6	2,9	17,0	25,0	4,3	3,9	22,0
11		3,6	14,4	3,0	22,3	32,3	4,8	4,0	19,0

Примечание. Твердость пластин из стали 20 ГОСТ 1050 составляла 10–12 HRC.

В таблице 4 приведены данные геометрических параметров валиков, наплавленных в одинаковых условиях, на одинаковых скоростях подачи электрода. По этим данным были рассчитаны размерные характеристики валиков (коэффициент формы наплавления $k_{фн} = e/g$, коэффициент формы проплавления $k_{фп} = e/a$ и коэффициенты полноты наплавки $\mu_{пн} = F_н/(eg)$), которые характеризуют полноту заполнения швом прямоугольника с размерами *e* и *g* [8, 15]. По этим показателям можно сделать вывод, что наплавку валиков для создания уплотнительных поверхностей энергетической арматуры целесообразно производить длинной дугой процессом наплавки *PulseSynergic*, который обеспечивает стабильные электрические и временным параметры, отвечающие сварочно-технологическим свойствам наплавляемых поверхностей.

Обсуждение и заключение. В результате проведенного исследования получены данные, которые имеют большое значение для изучения влияния дуговых сварочных процессов на размеры наплавленных валиков, на твердость уплотнительных поверхностей. Выявленные закономерности изменений во времени энергетических параметров режима наплавки короткой и длинной дугой в процессе переноса электродного металла в междуговом промежутке смогут учитываться при использовании малоинерционных сварочных инверторных источников питания специалистами в их практической деятельности. Проведенный анализ режимов дуговой наплавки валиков плавящимся электродом в защитных газах на детали затвора энергетической арматуры и полученные в ходе его конкретные данные могут быть использованы при дальнейшей разработке технологий дуговой наплавки и в будущих исследованиях по данной тематике. Выбор процесса дуговой наплавки плавящимся электродом в защитном газе уплотнительных поверхностей энергетической арматуры в пользу процесса наплавки *PulseSynergic* длинной дугой предоставляет возможность для обоснования минимизации электрических и временных параметров процесса сварки.

Список литературы / References

1. Лосев А.С., Еремин Е.Н., Гуржий А.С., Васенко О.Ю. Износостойкая наплавка уплотнительных поверхностей клина запорной арматуры. *Россия молодая: передовые технологии — в промышленность*. 2013;(1):073–076.

Losev AS, Eremin EN, Gurzhiy AS, Vasenko OYu. Wear-Resistant Facing of the Sealing Surfaces of the Stop Valve Wedge. *Rossiya molodaya: peredovye tekhnologii — v promyshlennost'*. 2013;(1):073–076. (In Russ.)

2. Соколов Г.Н., Лысак В.И. *Наплавка износостойких сплавов на прессовые штампы и инструмент для горячего деформирования сталей*. Волгоград: ВолгГТУ; 2005. 284 с.

Sokolov GN, Lysak VI. *Surfacing of Wear-Resistant Alloys on Press Dies and Tools for Hot Deformation of Steels.* Volgograd: VolgGTU; 2005. 284 p. (In Russ.)

3. Степин В.С., Старченко Е.Г., Волобуев Ю.С., Егоров М.Ю. Современные наплавочные материалы для уплотнительных поверхностей арматуры АЭС и ТЭС. *Арматуростроение*. 2006;41(2):55–56.

Stepin VS, Starchenko EG, Volobuev YuS, Egorov MYu. Modern Facing Materials for Sealing Surfaces of NPP and TPP Valves. *Valve Industry*. 2006;41(2):55–56. (In Russ.)

4. Ерофеев В.А., Захаров С.К., Кузнецов О.В. Особенности технологии дуговой наплавки упрочняющих слоев на стальную подложку. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2014;(11–1):132–138.

Erofeev VA, Zakharov SK, Kuznetsov OV. Features of Technology of Arc Surfacing Layers on the Steel Substrate. *Izvestiya Tula State University.* 2014;(11–1):132–138.

5. Sokolov GN, Zorin IV, Artem’ev AA, Elsukov SK, Dubtsov YuN, Lysak VI. Thermal- and Wear-Resistant Alloy Arc Welding Depositions Using Composite and Flux-Cored Wires with TiN, TiCN, and WC Nanoparticles. *Journal of Materials Processing Technology.* 2019;272:100–110. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.05.014

6. Еремин Е.Н., Филиппов Ю.О., Покровский Д.Г., Лосев А.С., Еремин А. Е. Износостойкая наплавка ножей горячей резки металлопроката. *Заготовительные производства в машиностроении*. 2008;(4):17–19.

Eremin EN, Filippov YuO, Pokrovskiy DG, Losev AS, Eremin AE. Wear-Resistant Surfacing of Hot-Cutting Knives for Rolled Metal Products. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii.* 2008;(4):17–19. (In Russ.)

7. Полосков С.С. Проблемы наплавки уплотнительных поверхностей трубопроводной арматуры и пути их решения. *Вестник Донского государственного технического университета.* 2019;19(4):349−356. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-4-349-356

Poloskov SS. Problems of Weld Overlay of Sealing Surfaces of Pipe Fitting and Solutions. *Vestnik of Don State Technical University.* 2019;19(4):349−356. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-4-349-356

8. Елсуков С.К. *Повышение эффективности двухэлектродной наплавки в защитных газах хромоникелевых аустенитных сталей на детали нефтехимического оборудования*. Дис. канд. техн. наук. Волгоград; 2023. 143 с.

Elsukov SK. *Improving the Efficiency of Two-Electrode Surfacing in Shielding Gases of Chromium-Nickel Austenitic Steels on Petrochemical Equipment Parts*. Cand.Sci. (Eng.), diss. Volgograd; 2023. 143 p. (In Russ.)

9. Еремин А.Е., Еремин Е.Н., Филиппов Ю.О., Маталасова А.Е., Кац В.С. Структура и свойства высокохромистого металла запорной арматуры, наплавленного серийно выпускаемыми сварочными проволоками. *Омский научный вестник*. 2014;127(1):55–58.

Eremin AE, Filippov YuO, Matalasova AE, Kats VS. Structure and Properties of High Chromium Metal Valves Overlaid by Serially Produced Welding Wires *Omsk Scientific Bulletin.* 2014;127(1):55–58.

10. Рогозин Д.В., Ленивкин В.А. Формирование технологического узкополосного наплавляемого слоя. *Сварка и диагностика*. 2023;(5):49–54.

Rogozin DV, Lenivkin VA. Formation of a Technological Narrow-Band Weld Layer. *Welding and Diagnostics.* 2023;(5):49–54.

11. Kah P, Suoranta R, Martikainen J. Advanced Gas Metal Arc Welding Processes. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2013;67:665–674. http://doi.org/10.1007/s00170-012-4513-5

12. Ленивкин В.А., Дюргеров Н.Г., Сагиров Х.Н. *Технологические свойства сварочной дуги в защитных газах*. 2-е изд., доп. Москва: НАКС; 2011. 368 с.

Lenivkin VA, Dyurgerov NG, Sagirov KhN. *Process Properties of Welding Arc in Shielding Gases*. 2nd ed., enl. Moscow: NAKS; 2011. 368 p. (In Russ.)

13. Ленивкин В.А., Рогозин Д.В. Разновидности саморегулирования процессов дуговой сварки плавящимся электродом. *Сварка и диагностика*. 2021;(1):53–60. https://doi.org/10.52177/2071-5234_2021_01_53

Lenivkin VA, Rogozin DV. Types of Self-Regulation of Consumable Arc Welding Processes. *Welding and Diagnostics.* 2021;(1):53–60. (In Russ.) https://doi.org/10.52177/2071-5234_2021_01_53

14. Потапьевский А.Г. *Сварка в защитных газах плавящимся электродом*. Часть 1. *Сварка в активных газах*. Изд. 2-е, переработанное. Киев: Екотехнология; 2007. 192 с.

Potap'evskii AG. *Gas-Shielded Welding with a Consumable Electrode*. Part 1. *Active Gas Welding.* 2nd rev. ed. Kiev: Ekotekhnologiya; 2007. 192 p. (In Russ.)

15. Милютин В.С. Катаев Р.Ф. *Сварочные свойства оборудования для дуговой сварки.* Москва: НАКС медиа; 2016. 457 с.

Milyutin VS, Kataev RF. *Welding Properties of Arc Welding Equipment*. Moscow: NAKS media; 2016. 457 p. (In Russ.)

Об авторах:

Дмитрий Викторович Рогозин, кандидат технических наук, доцент кафедры машин и автоматизации сварочного производства Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), SPIN-код, ORCID, ScopusID, dmrogozin@ya.ru

Вячеслав Андреевич Ленивкин, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник центра научных компетенций Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), SPIN-код, ORCID

Заявленный вклад авторов:

Д.В. Рогозин: проведение экспериментов, обработка экспериментальных данных, подготовка текста, формирование выводов.

В.А. Ленивкин: научное руководство, формирование основной концепции, цели и задачи исследования, доработка текста, корректировка выводов.

Конфликт интересов: **авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Dmitrii V. Rogozin, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Welding Fabrication Machines and Automation Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), SPIN-code, ORCID, ScopusID, dmrogozin@ya.ru

Vyacheslav A. Lenivkin, Dr.Sci. (Eng.), Leading Researcher at the Scientific Competence Center, Don State Technological University (Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), SPIN-code, ORCID

Claimed Contributorship:

DV Rogozin: conducting experiments, processing experimental data, preparation of the text, formulation of conclusions.

V.A. Lenivkin: academic advising, basic concept formulation, research objectives and tasks, revision of the text, correction of the conclusions.

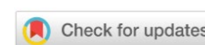
Conflict of Interest Statement: **the authors do not have any conflict of interest.**

All authors have read and approved the final manuscript.

Поступила в редакцию / Received 31.10.2024
Поступила после рецензирования / Reviewed 22.11.2024
Принята к публикации / Accepted 27.11.2024

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ
INFORMATION TECHNOLOGY, COMPUTER SCIENCE AND MANAGEMENT





УДК 519.688 *Оригинальное эмпирическое исследование*

https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-4-413-423

Алгоритм построения функции риска расширенной модели Кокса и его применение на базе данных больных раком предстательной железы



EDN: LNZDKF

И.И. Микулик[1] ✉, **Г.М. Жаринов**[2], **А.Ю. Кнеев**[2]

[1] Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

[2] Российский научный центр радиологии и хирургических технологий имени академика А.М. Гранова Минздрава России, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

✉ mikulik.ilia@gmail.com

Аннотация

Введение. В медицине и связанных с нею отраслях для анализа выживаемости используются биоинспирированные подходы, среди которых особое место занимает регрессионная модель Кокса. Практика ее применения описана в теоретической и прикладной литературе. Однако требует тщательной проработки существенный недостаток данного метода. Дело в том, что признаки коррелируют с функцией риска линейно, и модель не задействует более сложные зависимости. Это создает трудности при исследовании анализа выживаемости. Представленная работа нацелена на решение данной проблемы. Объект изучения — расширенная модель Кокса, в которой функция риска включает нелинейную комбинацию признаков.

Материалы и методы. Использовалась база данных больных раком предстательной железы, так как в мировой онкологии это широко распространенный диагноз. Определен класс расширенных моделей Кокса с аддитивно-мультипликативной функцией риска. Для решения задачи методом оптимизации построена функция приспособленности, которая оценивает результаты прогнозов, количество признаков, а также степень переобучения модели — сложность и нагруженность составленной функции риска. Для оптимизации функции приспособленности разработан алгоритм муравьев-опылителей. Он имитирует размножение цветковых растений с помощью насекомых-опылителей и состоит из трех частей: муравьиный алгоритм, генетический алгоритм и алгоритм опыления. Качество обучения модели Кокса оценивали по С-индексу.

Результаты исследования. Предложен метаэвристический алгоритм оптимизации муравьев-опылителей, позволяющий строить функции риска расширенной модели Кокса. Набор параметров для обучения стандартной модели Кокса — весь используемый комплекс признаков: распространенность опухолевого процесса, время удвоения простатспецифического антигена (ПСА), сумма баллов по шкале Глисона, сывороточная концентрация ПСА на момент постановки диагноза, возраст и образование пациента, резус-фактор. Значение с-индекса обученной модели — 0,853691. Расширенная модель Кокса с найденной аддитивно-мультипликативной функцией риска имеет более высокий показатель С-индекса — 0,856241 с меньшим количеством используемых признаков (распространенность опухолевого процесса, время удвоения ПСА и сумма баллов по Глисону). По качеству этот подход не уступает классической модели Кокса или превосходит ее. Сокращение числа задействованных признаков должно повысить оперативность врачебного решения и ускорить начало лечения.

Обсуждение и заключение. Представленный алгоритм построения моделей анализа выживаемости повысил точность предсказания наступления терминального события и уменьшил количество используемых для этой цели признаков. Разница в точности для исследуемого набора данных представляется несущественной — С-индекс

возрос с 0,853691 до 0,856241 (на 0,3 %). При этом количество принимаемых во внимание признаков сократилось с 7 до 3 (на 57,1 %). Следовательно, предложенный метод эффективно решает задачу выбора признаков и может быть применен для повышения качества прогнозирования.

Ключевые слова: рак предстательной железы, прогнозирование выживаемости, вероятность наступления терминального события, регрессионная модель Кокса, алгоритм муравьев-опылителей

Благодарности. Авторы благодарят Благовещенскую Е.А., доктора физико-математических наук, профессора, за консультацию в области теории графов и алгоритмов оптимизации.

Для цитирования. Микулик И.И, Жаринов Г.М, Кнеев А.Ю. Алгоритм построения функции риска расширенной модели Кокса и его применение на базе данных больных раком предстательной железы. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2024;24(4):413–423. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-4-413-423

Original Empirical Research

Algorithm for Constructing the Hazard Function of the Extended Cox Model and its Application to the Prostate Cancer Patient Database

Ilya I. Mikulik[1] ✉, **Gennadiy M. Zharinov**[2], **Aleksei Y. Kneev**[2]

[1] Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Saint Petersburg, Russian Federation

[2] Granov's Russian Research Center for Radiology and Surgical Technologies, Saint Petersburg, Russian Federation

✉ mikulik.ilia@gmail.com

Abstract

Introduction. In medicine and related industries, bioinspired approaches are used for the survival analysis, among which the Cox regression model holds a specific place. The practice of its application is described in the theoretical and applied literature. However, a significant drawback of this method requires careful study. The fact is that the features correlate with the hazard function linearly, and the model does not use more complex dependences. This causes some difficulties in studying survival analysis. The presented work is aimed at solving this problem. The object of study is the extended Cox model, in which the hazard function includes a nonlinear combination of features.

Materials and Methods. A database of prostate cancer patients was used, since this is a common diagnosis in global oncology. A class of extended Cox models with an additive/multiplicative hazard function was defined. To solve the problem using the optimization method, a fitness function was constructed that evaluated the results of prognosis, the number of features, and the degree of overtraining of the model — the complexity and load of the compiled hazard function. An algorithm of pollinating ants has been developed to optimize the fitness function. It simulates the reproduction of flowering plants using pollinating insects and consists of three parts: an ant colony algorithm, a genetic algorithm, and an ant pollinator algorithm. The quality of training of the Cox model was assessed by C-index.

Results. A metaheuristic algorithm for ant pollinator optimizing was proposed, providing for the construction of hazard functions of the extended Cox model. The set of parameters for training the standard Cox model was the entire set of features used: TNM, prostate-specific antigen doubling time (PSADT), Gleason score, serum PSA concentration at diagnosis, patient age and education, Rh factor. C-index value of the trained model was 0.853691. The extended Cox model with the found additive/multiplicative hazard function had a higher C-index value — 0.856241 with a smaller number of features used (TNM, PSADT, and Gleason score). In terms of quality, this approach is not inferior to or superior to the classical Cox model. Reducing the number of features involved should improve the efficiency of medical decisions and speed up the start of treatment.

Discussion and Conclusion. The presented algorithm for constructing survival analysis models increased the accuracy of predicting the occurrence of a terminal event, and reduced the number of features used for this purpose. The difference in accuracy for the studied data set seemed insignificant — C-index increased from 0.853691 to 0.856241 (by 0.3%). At this, the number of features taken into account was reduced from 7 to 3 (by 57.1%). Consequently, the proposed method effectively solves the problem of feature selection, and can be applied to improve the quality of prognostication.

Keywords: prostate cancer, survival prediction, terminal event probability, Cox regression model, ant pollinator algorithm

Acknowledgements. The authors would like to thank E.A. Blagoveshchenskaya, Dr.Sci. (Phys.-Math.), Professor, for consulting on issues of the graph theory and optimization algorithms.

For Citation. Mikulik II, Zharinov GM, Kneev AY. Algorithm for Constructing the Hazard Function of the Extended Cox Model and its Application to the Prostate Cancer Patient Database. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2024;24(4):413–423. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-4-413-423

Введение. Анализ выживаемости представляет собой совокупность статистических методов, позволяющих оценить вероятность наступления терминального события, после которого объект выходит из-под наблюдения. Методы предполагают работу с данными, имеющими временную характеристику. Это время от начала наблюдения до наступления терминального события или выхода объекта из-под наблюдения. Возможность работы с объектами, вышедшими из-под наблюдения, представляет интерес для прикладных областей науки, в том числе для медицины [1].

Одна из классических моделей анализа выживаемости — регрессионная модель Кокса [2]. Ее функция риска использует линейную комбинацию признаков, что в общем случае может быть не вполне корректно, так как влияние признаков на значение функции риска может быть выражено нелинейной корреляцией. Для каждой задачи вклад признаков и функция риска могут коррелировать по-разному. Это определяется используемыми данными и требует особых подходов к поиску форм зависимостей. Разные способы определения зависимостей признаков в функции риска рассмотрены в [3]. В настоящей работе предлагается использовать расширенную модель Кокса, функция риска которой устанавливает не только аддитивную, но и мультипликативную комбинацию признаков. Кроме того, описан метод построения таких моделей в зависимости от используемых данных и набора признаков.

Построение модели предполагает решение задачи отбора признаков, одной из ключевых в анализе данных [4]. Она заключается в поиске оптимального набора признаков, достаточного для построения прогноза. Решение дает представление о том, какие признаки имеют бо́льшую прогностическую значимость. Задачу можно сформулировать в терминах оптимизации и решить методами оптимизации. Предложенный для ее решения алгоритм муравьев-опылителей относится к метаэвристическим гибридным методам оптимизации. Он задействует муравьиный и генетический алгоритмы оптимизации, а также впервые разработанную модель скрещивания цветов.

Алгоритм реализован на базе данных больных раком предстательной железы. В мировой медицинской практике это одно из наиболее распространенных злокачественных новообразований у мужчин [5]. Внедрение скрининга на основе оценки сывороточной концентрации простатспецифического антигена (ПСА) существенно изменило структуру впервые выявленных случаев рака предстательной железы. Если ранее большинство из них приходилось на местно-распространенную и метастатическую формы опухоли, то в настоящее время доминирует локализованная. Благодаря этому увеличилась частота радикальных вмешательств и приблизились к 100 % показатели десятилетней выживаемости отдельных групп пациентов, перенесших радикальную простатэктомию или комбинированную гормонолучевую терапию.

Несмотря на очевидные успехи в диагностике и лечении рака предстательной железы, остаются нерешенными несколько важных вопросов, требующих исследования.

Современные методы прогнозирования выживаемости при раке предстательной железы основаны на совокупности факторов: возраст, распространенность и гистологическая дифференцировка опухоли, сывороточная концентрация ПСА, время его удвоения [6] и плотность [7]. Модель Кокса и другие модели анализа выживаемости дают о ней общее представление, но их точность в прогнозировании исходов для отдельных пациентов может варьироваться. Более того, прогноз, составленный по совокупности признаков, не дает представления о значимости каждого из них. Данное обстоятельство ограничивает возможности клиницистов адаптировать рекомендации по лечению к потребностям конкретного пациента.

Улучшение подходов к оценке выживаемости онкологического пациента — ключевой аспект научного поиска в области онкологии. Все больше внимания уделяется точности прогнозирования, которая критически важна для выбора терапевтической стратегии. Качественная прогностическая модель более точно определяет риск для больного и позволяет адаптировать подходы к лечению в зависимости от ожидаемого исхода. Это может улучшить и результаты лечения, и качество жизни пациента.

В условиях высокой нагрузки на медицинский персонал сокращение количества признаков в модели прогноза представляет значительную практическую ценность, так как сокращает временны́е затраты на принятие врачебных решений. Упрощение модели позволяет сделать акцент на ключевых аспектах клинической картины, что снижает вероятность некорректных интерпретаций данных. Кроме того, использование ограниченного набора признаков повышает воспроизводимость и стабильность результатов прогноза, то есть его надежность.

Цель настоящего исследования — разработка алгоритма построения моделей анализа выживаемости с отбором ключевых признаков. Точность нового подхода должна быть не ниже, чем у модели Кокса. Отметим, что различные способы построения функций риска модели Кокса задают не одну расширенную модель Кокса, а целый класс алгоритмов с различными функциями риска. Этот подход к адаптации функции риска под набор имеющихся данных и признаков выбран в качестве способа достижения поставленной цели.

Ниже перечислены задачи, решенные в данной работе.

1. Определен класс расширенных моделей Кокса с аддитивно-мультипликативной функцией риска.
2. Построена функция приспособленности, оценивающая результаты прогнозов расширенной модели Кокса.

3. Создан метод оптимизации, решающий поставленную задачу.

4. Разработана программа, реализующая предложенный алгоритм.

5. Получен результат работы программы на базе данных пациентов, больных раком предстательной железы, и показана эффективность разработанного алгоритма.

Материалы и методы. В анализе выживаемости для оценки риска наступления рассматриваемого события используются функции выживаемости и риска. Первая — это стохастическая характеристика, определяющая вероятность выживания (отсутствие терминального события) на протяжении заданного времени. Другими словами, функция выживаемости $S(t)$ определяется как вероятность того, что терминальное событие не наступит до момента времени t:

$$S(t) = P(T > t),$$

где T — время наступления терминального события.

Модели анализа выживаемости строят кривые выживаемости для каждого образца данных по его признакам. Модели часто задают с помощью функции риска, которая определяет вероятность наступления терминального события в бесконечно малый промежуток времени между t и Δt при условии, что оно не наступило до момента t:

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{P\left(t \le T < t + \Delta t \middle| T \ge t\right)}{\Delta t}.$$

Модель пропорциональных рисков Кокса вычисляет функцию риска для одного экземпляра как линейную комбинацию его признаков, устанавливая взаимосвязь между признаками экземпляра и функцией риска.

С одной стороны, явное задание функции риска делает модель прозрачной и удобной для интерпретации прогнозов. С другой стороны, предположение о линейной взаимосвязи признаков и прогноза является ограничением и не может выполняться для всех практических задач.

Результаты исследования. Пусть S — набор данных для обучения. Функция риска в классической модели Кокса:

$$\lambda\left(t \middle| X_i\right) = \lambda_0\, exp\left(\beta_1 X_{i1} + \ldots + \beta_p X_{ip}\right) = \lambda_0\, exp\left(\beta \cdot X_i\right),$$

где β — вектор влияния признаков; $X_i \in S$ — экземпляр данных.

В [3] функция риска модели Кокса рассматривается в обобщенном виде $\lambda(t|X_i) = \lambda_0 exp(g(\beta \cdot X_i))$, где $g(\beta \cdot X_i)$ — функция, устанавливающая зависимость между признаками экземпляров. В данной работе функция g является полиномом специального вида.

Пусть $F = \{f_1, f_2, \ldots, f_n\}$ — множество всех признаков. $|F| = p$. F_t — подмножество признаков: $F_t \subset F$. $P_q(F_t)$ — полином, составленный из признаков $f \in F_t$:

$$P_q\left(F_t\right) = \sum_{i=1}^{|\xi|} \varphi_i \sum_{j=1}^{|F_t|} f_i^{\xi_{ij}},$$

где $\xi = \{(\xi_1, \xi_2, \ldots, \xi_{|F_t|})\}$, $\xi_i \in \{0;\, 1\}$ — множество индикаторов вхождения i-го признака в слагаемое полинома; $\varphi_i \in \{0,\, 1\}$ — маркер, указывающий на вхождение i-го монома в P_q.

Таким образом, полином $P_q(F_t)$ — это сумма одночленов, каждый из которых является произведением признаков. При этом степень признака в одночлене не более единицы. Функцию риска $\lambda(t|X_i) = \lambda_0 exp(g(\beta \cdot X_i))$, где $g(\beta \cdot X_i) = P_q(F_t, \beta \cdot X_i)$, назовем аддитивно-мультипликативной, так как значение каждого признака в ней может входить либо в состав суммы, либо в состав произведения.

Для получения и обработки результатов необходимо оценить качество построенной модели. В работе [8] качество модели оценивается с помощью функции потерь, и это общий подход для любой обучающейся модели. В качестве оценивающего показателя чаще других используется индекс соответствия (C-индекс). Его же выбрали для оценки расширенной модели Кокса. C-индекс учитывает как наблюдаемые события, так и цензурированные случаи [9]. При этом количественно определяется ранговая корреляция между фактическим временем выживания и прогнозами модели. C-индекс показывает соотношение правильно упорядоченных (согласованных) и сопоставимых пар [10].

В работе рассматривается гипотеза о расширенной модели Кокса с точностью предсказаний не ниже, чем у классической модели Кокса.

Пусть $c(S, P_q(F_t))$ — C-индекс расширенной модели Кокса, обученной на данных S, с аддитивно-мультипликативной функцией риска, построенной с помощью полинома $P_q(F_t)$, а $c(S, P_\Sigma(F))$ — C-индекс классической модели Кокса, обученной на тех же данных S. Гипотезу можно сформулировать в виде:

$$\exists P_q\left(F_t\right), F_t \subset F : c\left(S, P_q\left(F_t\right)\right) \ge c\left(S, P_\Sigma\left(F\right)\right). \quad (1)$$

Для поиска нетривиальных примеров гипотезы поставили задачу и разработали алгоритм. Задачу можно сформулировать в терминах теории оптимизации. Необходимо построить полином $P_q(F_t)$ на подмножестве F с наибольшим значением $c(S, P_q(F_t))$ при минимальном наборе признаков F_t. Таким образом, вводятся два условия оптимизации $c(S, P_q(F_t)) \rightarrow max$ и $|F_t| \rightarrow min$. Следует учитывать еще одну проблему построения полинома. С увеличением числа возможных признаков экспоненциально растет количество возможных многочленов, в том числе сконструированных из-за переобучения. Как правило, такие многочлены состоят из суммы сравнительно большого количества мономов, а сами мономы — из большого количества множителей. Такие полиномы увеличивают точность модели лишь на обученных данных и слабо поддаются анализу.

Чтобы избавиться от проблемы переобучения, в работе предложена оптимизация по двум дополнительным критериям: количеству мономов в составе $P_q(F_t)$ и нагруженности полинома $P_q(F_t)$, которая отражает количество мультипликативных связей в полиноме.

Количество мономов определяется как $\sum_i^{|\xi|} \varphi_i$ Однако для построения корректного условия необходимо учитывать нелинейность вклада количества признаков в целевую функцию. При малом количестве входящих признаков ожидается более существенное изменение показателя, чем при большом. Поэтому в работе предложен показатель:

$$K_q = \frac{log_2\left(\sum_i^{|\xi|} \varphi_i\right)}{p}.$$

Отметим, что значение K_q не превышает 1.

$\sum_i^{|\xi|} \varphi_i \rightarrow max$ при $\forall\varphi_i = 1$, следовательно:

$$\sum_i^{|\xi|} \varphi_i = |\xi| = 2^p - 1,$$

$$log_2\left(2^p - 1\right) < log_2 2^p = p,$$

$$K_q < 1.$$

Не совсем корректно определять нагруженность полинома как количество мультипликативных связей. В этом случае не отражается реальная оценка сложности полинома при разном количестве входящих в него мономов. Показатель должен демонстрировать нагруженность каждого входящего монома, поэтому в работе введена следующая величина, не превышающая 1:

$$B_q = \frac{\sum_{i,\varphi_i \neq 0} \sum_{j=1}^{|F|_t} \xi_{ij}}{\sum_i^{|\xi|} \varphi_i \cdot |F_t|}.$$

С учетом введенных характеристик задача оптимизации заключается в поиске $P_q(F_t)$ при условиях:

$$\begin{cases} c\left(S, P_q\left(F_t\right)\right) \rightarrow max, \\ F_t \rightarrow min, \\ K_q \rightarrow min, \\ B_q \rightarrow min. \end{cases} \quad (2)$$

Перейдем к одномерной оптимизации с помощью введения балансировочных коэффициентов ω:

$$f = \omega_1 c\left(S, P_q\left(F_t\right)\right) - \omega_2 \frac{F_t}{p} - \omega_3 K_q - \omega_4 B_q \rightarrow max.$$

Или представим в виде суммы:

$$f = \omega_1 \cdot c\left(S, P_q\left(F_t\right)\right) + \omega_2 \cdot \left(1 - \frac{F_t}{p}\right) + \omega_3 \cdot \left(1 - K_q\right) + \omega_4 \cdot \left(1 - B_q\right) \rightarrow max. \quad (3)$$

Последняя форма записи при необходимости позволяет зафиксировать значение целевой функции f, введя явную зависимость между балансировочными коэффициентами:

$$\omega_1 = \frac{\gamma_1}{1 + \gamma_2 + \gamma_3},$$

$$\omega_2 = \frac{\gamma_2}{1 + \gamma_1 + \gamma_3},$$

$$\omega_3 = \frac{\gamma_3}{1 + \gamma_1 + \gamma_2},$$

$$\omega_4 = 1 - \omega_1 - \omega_2 - \omega_3.$$

При любых $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3 \in (0; 1)$. Так, выбирая нужные γ_i или напрямую ω_i, можно усиливать или ослаблять соответствующие условия системы (2). Задача заключается в поиске максимума целевой функции f (3) при определенных ω_i.

Для решения задачи оптимизации в статье представлен разработанный алгоритм муравьев-опылителей. Он основан на модели муравьиной колонии, адаптированной под поставленную задачу. Алгоритм преобразовывает в модель набор вершин графа, представляющих признаки или их произведение. Имитируется процесс опыления и размножения цветковых растений с помощью насекомых-опылителей. Решение включает три алгоритма:

– муравьиный используется для построения модели;

– генетический улучшает работу муравьиного алгоритма;

– алгоритм опыления позволяет выбрать признаки или их произведения.

Результат работы алгоритма — полином $P_q(F_t)$, максимизирующий функцию f (3). Каждый моном, входящий в сумму полинома, представлен цветком. Множество цветков образует граф. По нему строят путь муравьи-опылители. Каждый муравей определяет множество цветов, и сумма соответствующих им мономов образует полином $P_q(F_t)$. Оценка построенного муравьем пути — это значение функции f (3) для расширенной модели Кокса с $g = P_q(F_t)$.

Муравьиный этап алгоритма представляет собой адаптированный к задаче простой муравьиный алгоритм [11]. Каждый муравей k имеет разный набор параметров α_k, β_k, Q_k. Чувствительность муравьев к феромонам α_k определяет степень эксплуатации муравьями найденных решений. Эвристическая чувствительность β_k устанавливает уровень эксплуатации эвристической информации. Интенсивность феромона Q_k определяет количество феромона, которое отложит муравей на цветок в процессе поиска решения. Статические параметры алгоритма: количество муравьев n, скорость испарения ρ, первоначальный уровень феромонов τ_0.

Каждый муравей выбирает вершину стохастически по правилу:

$$p_v^k(t) = \frac{\tau_v^{\alpha_k}(t)\eta_v^{\beta_k}}{\sum_u \tau_u^{\alpha_k}(t)\eta_v^{\beta_k}}, \tag{4}$$

где $p_v^k(t)$ — вероятность выбора цветка v муравьем k на итерации t; $\tau_v(t)$ — количество отложенного феромона на цветке v на итерации t; η_v — эвристическая информация, которая вычисляется как $\eta_v = c(S, P_i \equiv v)$. Во второй части этого равенства — c-индекс расширенной модели Кокса, обученной на одном мономе цветка v.

Каждый муравей откладывает феромон в соответствии с правилом:

$$\Delta\tau_v = \frac{Q_k}{f\left(P_q\left(F_t\right)\right)}, \tag{5}$$

где $P_q(F_t)$ — полином, построенный муравьем k; f — целевая функция.

Второй этап — приложение генетического алгоритма. Он модифицирует параметры муравьиного алгоритма с учетом эффективности найденных решений [12]. Алгоритм последовательно применяет к популяции муравьев (к их параметрам) три оператора: выбора, кроссинговера, мутации. В качестве оператора выбора используется метод рулетки. Муравей попадает в новую популяцию с вероятностью:

$$p_i = \frac{f\left(P_i\left(F_t\right)\right)}{\sum_j f\left(P_j\left(F_t\right)\right)}. \tag{5}$$

Оператор скрещивания — побитовая сумма битовых представлений параметров выбранных особей. Оператор мутации — инверсия случайного бита у битового представления параметра особи.

Феромоны, оставленные на вершинах-цветах, также применяются на этапе опыления. Данный этап использует популяционную идею. К популяции цветов прилагаются четыре оператора: селекции, кроссбридинга, лайнбридинга и старения. Каждый цветок кроме хранимого значения вершины-монома имеет параметр — возраст. Оператор селекции выбирает цветы с наибольшей концентрацией феромонов. Оператор кроссбридинга с некоторой вероятностью вводит новые цветы, моном которых представляет произведение объединения признаков из мономов цветов-родителей:

$$v_i = \left(e_i, \tau_i, \eta_i, o_i\right),$$

$$v_i \times v_j = v_k, v_k = \left(e_k = \prod f_q \in e_i \cup e_j\, f_q, \tau_k = \frac{\tau_i + \tau_j}{2}, \eta_k = c\left(S, P \equiv e_k\right), o_k = o_{max}\right),$$

где e — моном нового цветка; τ — случайное количество феромона, не превосходящее τ_0, отложенного на цветок; η — эвристическая составляющая; o — возраст цветка; o_{max} — установленная продолжительность жизни цветка.

Если в результате преобразования появились цветы, уже находящиеся в популяции, то новые цветы не создаются, а обновляется возраст у имеющихся. Оператор лайнбридинга с небольшой вероятностью добавляет в популяцию новый цветок с единственным признаком. Этот оператор используется, чтобы оставить возможность вытесненным признакам участвовать в работе алгоритма. Оператор старения понижает индикатор возраста у каждого цветка. Если индикатор старения стал равен нулю, цветок выбывает из популяции.

Таким образом, конфигурируемые параметры алгоритма: n, τ_0, ρ, o_{max}, α_0, β_0, Q_0, p_{kross}, p_{mut}. Выбор их значений зависит от текущей прикладной задачи и влияет на скорость сходимости алгоритма. Отметим, что параметры α_0, β_0, Q_0 адаптируются в ходе работы генетического алгоритма, поэтому их первоначальные значения не имеют большого влияния на скорость сходимости алгоритма, особенно при значительном количестве итераций представленного ниже алгоритма.

Начало

1. Определить параметры n, τ_0, ρ, o_{max}, α_0, β_0, Q_0, p_{kross}, p_{mut}

2. Положить $c = 0$, $P = \emptyset$

3. Положить множество цветов $V = \{v_i = (e_i = f_i, \tau_i = rand(0, \tau_0), \eta_i = c(S, P_i \equiv f_i), o_i = o_{max}) \mid \forall f_i \in F\}$

4. Положить множество муравьев $A = \{\alpha_k = (\alpha_k = \alpha_0, \beta_k = \beta_0, Q_k = Q_0)\}$

5. До достижения критерия остановки

5.1. Для каждого муравья $\alpha_k \in A$

5.1.1. $E_k(t) = \{v_{random}\}$

5.1.2. $c_k(t-1)$

5.1.3. $c_k(t) = \eta_i$

5.1.4. Пока $c_k(t) > c_k(t-1)$

5.1.4.1. Выбрать v в соответствии с правилом (4)

5.1.4.2. $E_k(t) = \cup \{v\}$

5.1.4.3. $c_k(t-1) = c_k(t)$

5.1.4.4. $P_k = \sum_{i, v_i \in E_k(t)} e_i$

5.1.4.5. $c_k(t) = f(S, P_k)$

5.1.5. Если $c_k(t) > c$

5.1.5.1. $c = c_k(t)$

5.1.5.2. $P = P_k$

5.1.6. Для каждого $v_i \in E_k(t)$ вычислить $\Delta\tau_v$ в соответствии с правилом (5)

5.2. Применить оператор выбора $A = S_{selection}(A)$

5.3. Применить оператор кроссинговера $A = S_{crossover}(A)$

5.4. Применить оператор мутации $A = S_{mutation}(A)$

5.5. Применить оператор селекции цветов $V = S_{selection}(V)$

5.6. Применить оператор кроссбридинга $V = S_{crossbreeding}(V)$

5.7. Применить оператор лайнбридинга $V = S_{linebreeding}(V)$

5.8. Применить оператор старения $V = S_{aging}(V)$

6. Вернуть значения c, P

Критерием остановки алгоритма может быть количество итераций или сходимость решений к одному значению. Таким образом, представленный метод оптимизации муравьев-опылителей решает задачу построения функции риска и отбора признаков для расширенной модели Кокса. Если для гипотезы (1) есть нетривиальные примеры, их можно найти описанным методом.

Алгоритм протестировали на базе данных больных раком предстательной железы. Они лечились или наблюдались с января 1996 по декабрь 2016 года в Российском научном центре радиологии и хирургических технологий имени академика А. М. Гранова Минздрава России [13]. В исследование включены обезличенные данные о распространенности опухолевого процесса у 5073 пациентов.

Перечень признаков, используемых в работе, с их описанием и количеством ненулевых записей представлен в таблице 1.

Таблица 1

Признаки набора данных

Название признака		Описание	Значение	Количество заполненных записей
краткое	полное			
‘ТР’	Тип распространения опухолевого процесса	Поражение соседних органов и структур, наличие регионарных и отдаленных метастазов	1 — локализованный 2 — местно-распространенный 3 — метастатический	5073
‘ВУ’	Время удвоения ПСА	Удвоение сывороточной концентрации ПСА, указывающее на возможное удвоение числа опухолевых клеток	Число с плавающей точкой	2423
‘ПГ’	Сумма баллов по шкале Глисона	Порядковая переменная. Отражает гистологическую дифференцировку опухоли	1 — ПГ < 7 2 — ПГ = 7 3 — ПГ > 7	3968
‘ПСА’	Сывороточная концентрация ПСА, послужившая основанием для биопсии	Простат-специфический антиген. Гликопротеин, сериновая протеаза в норме вырабатывается секреторным эпителием предстательной железы. Разжижает эякулят, улучшает подвижность сперматозоидов. Концентрация выше 4 нг/мл может быть основанием для биопсии	Число с плавающей точкой	4760
‘образование’	Уровень образования пациента	Завершенное образование пациента на момент постановки диагноза	0 — среднее общее 1 — среднее специальное 2 — высшее 3 — ученая степень	4622
‘возраст’	Возраст пациента	Возраст пациента на момент постановки диагноза	Целое число	5073
‘резус’	Резус-фактор	Наличие или отсутствие белка, отвечающего за резус-фактор	1 — положительный 2 — отрицательный	399

Не все признаки, представленные в таблице 1, существенны для исследования выживаемости. Есть и малозначимые (например, ‘образование’, ‘резус’). Они нужны для демонстрации корректной работы алгоритма, решающего задачу отбора признаков. Наличие коррелируемых и не очень важных признаков показывает практическую возможность использования алгоритма в условиях, когда заранее не известны ни зависимость признаков, ни их значимость.

Алгоритм реализован на языке программирования Python в пакете CoxPHFitter из библиотеки Lifelines. Для хранения и обработки данных использовалась программная библиотека Pandas.

Перед запуском алгоритма данные предварительно обработали. Это обусловлено тем, что в базе данных больных раком предстательной железы есть пропуски по ряду значений у некоторых пациентов. Для устранения проблемы использовали два способа обработки базы данных — удаление наблюдений и замена с учетом других значений в столбце [14]. Признаки ‘ТР’, ‘ВУ’ и ‘возраст’ являются важными и играют роль индикатора консистентности данных, поэтому удалялись наблюдения без этих признаков. Показатель Глисона ранжировали. Каждому наблюдению присвоили одно из трех значений: 1 — ПГ < 7 (1281 наблюдений); 2 — ПГ = 7 (1479 наблюдений); 3 — ПГ > 7 (1208 наблюдений).

Для остальных признаков отсутствующие значения заполняли методом *k*-взвешенных ближайших соседей. Такое восстановление пропущенных значений основывается на предположении, что близость экземпляров по

измеренным признакам указывает на их близость по неизмеренным признакам [15]. Метод *k*-взвешенных ближайших соседей предпочтителен ввиду небольших временных затрат на восстановление пропущенных значений [16], хотя есть более эффективные подходы [17].

Алгоритм реализован со следующим набором параметров: n = 12; τ_0 = 0,01; ρ = 0,8; o_{max} = 3; α_0 = 0,5; β_0 = 2; Q_0 = 25; p_{kross} = 0,9; p_{mut} = 0,2. Приведенный список значений параметров рекомендуется для первоначальной конфигурации алгоритма. Однако его можно изменить для решения конкретной задачи. В таблице 2 представлены результаты предложенного алгоритма.

Таблица 2

Значения С-индекса и функции приспособленности f в зависимости от полинома функции риска расширенной модели Кокса, найденного при заданных балансировочных коэффициентах

Полином аддитивно-мультипликативной функции риска расширенной модели Кокса	С-индекс	Функция приспособленности	Балансировочные коэффициенты ω_1; ω_2; ω_3; ω_4
‘ТР’+‘ВУ’	0,836789	0,782894	0,91;0,05;0,05;0,05
‘ТР’×‘ПГ’+‘ВУ’	0,840516	0,842814	0,99;0,05;0,05;0,05
‘ТР’+‘ВУ’+‘ПГ’	0,849790	0,746328	0,9;0,0;0,05;0,05
‘ТР’+‘ВУ’+‘ПГ’+‘ТР’×‘ВУ’	0,849828	0,827410	0,94;0,05;0,0;0,0
‘ТР’+‘ПГ’+‘ТР’×‘ВУ’×‘ПГ’	0,849830	0,841567	0,97;0,05;0,05;0,0
‘ТР’+‘ПГ’+‘ВУ’×‘ПГ’	0,850000	0,787661	0,94; 0,0;0,05;0,0
‘ТР’+‘ВУ’+‘ПГ’+‘ПСА’+‘образование’+ ‘возраст’+‘резус’	0,853691	0,838012	0,99; 0,0;0,0;0,05
‘ТР’+‘ВУ’+‘ПГ’+‘ТР’×‘ПГ’	0,855292	0,809308	0,94;0,05;0,0;0,05
‘ТР’+‘ТР’×‘ПГ’+‘ПГ’+‘ТР’×‘ВУ’	0,856241	0,764870	0,91;0,0;0,05;0,0
‘ТР’+‘ТР’×‘ПГ’×‘ПСА’+‘ПГ’+‘ПСА’+ ‘ПГ’×‘ПСА’+‘ВУ’+‘ТР’×‘ПГ’+‘ТР’×‘ПСА’	0,861085	0,839459	0,95;0,05;0,0;0,0
‘ТР’+‘ВУ’+‘ПГ’+‘ПСА’+‘образование’+ ‘возраст’+‘резус’+‘ТР’×‘ПГ’+‘ТР’×‘ПСА’+ ‘ПГ’×‘ПСА’	0,861643	0,826508	0,97;0,0;0,0;0,05
‘ТР’+‘ВУ’+‘ПГ’+‘ПСА’+‘образование’+ ‘резус’+‘ТР’×‘ПГ’+‘ТР’×‘ПСА’+‘ПГ’× ‘ПСА’+‘ПСА’×‘возраст’	0,862345	0,845098	0,98;0,0;0,0;0,0

В таблице 2 вариации вхождения признаков в функцию риска ранжированы по возрастанию С-индекса. Здесь также указаны значения балансировочных коэффициентов фитнесс-функции (3), при которых найдено представленное решение и значение самой функции. Последние строки таблицы содержат функции риска с наиболее высоким индексом согласованности. Они достаточно сложны для анализа из-за нагруженности, связанной с низкими значениями соответствующих балансировочных коэффициентов.

Обсуждение и заключение. Лучший набор признаков для обучения стандартной (нерасширенной) модели Кокса — это весь представленный набор признаков, то есть функция ‘ТР’ + ‘ВУ’ + ‘ПГ’ + ‘ПСА’ + ‘образование’ + ‘возраст’ + ‘резус’ со значением с-индекса 0,853691. В то же время расширенная модель Кокса с найденной функцией риска ‘ТР’ + ‘ТР’ × ‘ПГ’ + ‘ПГ’ + ‘ТР’ × ‘ВУ’ имеет более высокий показатель с-индекса — 0,856241 с меньшим количеством используемых признаков.

Итоги данной научной работы позволяют сделать определенные выводы. Если иметь в виду представленную базу данных, то параметров ‘ТР’, ‘ВУ’, ‘ПГ’ достаточно для построения качественной модели анализа выживаемости. Таким образом, результат исследования — это возможность построения модели выживаемости с меньшим количеством используемых признаков. Причем предложенное решение не уступает или превосходит результативность классической модели Кокса, для обучения которой задействуют много признаков.

Алгоритм, созданный в рамках данной работы, способен решать задачу нахождения лучшей комбинации признаков за приемлемое число итераций (30). Набор регуляризующих коэффициентов позволяет задать алгоритму определенную конфигурацию. Благодаря этому специалист прикладной области может сделать выбор в пользу улучшения качества предсказания, сокращения количества признаков или исключения проблемы переобучения.

Итак, класс метаэвристических алгоритмов приемлем для решения поставленной задачи. На этапе опыления строятся мономы в полиноме, то есть проводится поиск мультипликативных зависимостей признаков. На этапе муравьиного алгоритма строится полином из мономов, то есть идет поиск аддитивных зависимостей признаков. Генетический этап необходим, чтобы улучшить сходимость и стабильность работы муравьиного алгоритма.

Для рассмотренного набора данных предложенный алгоритм повысил точность предсказания. Правда, незначительно. C-индекс увеличился всего на 0,3 %, с 0,853691 до 0,856241. Однако количество рассматриваемых признаков сократилось на 57,1 %, с 7 до 3. Меньшее число признаков в прогностической модели облегчает работу врачей, позволяет выиграть время при принятии решений и может снизить вероятность ошибок при интерпретации данных.

Список литературы / References

1. Archetti A, Lomurno E, Lattari F, Martin A, Matteucci M. Heterogeneous Datasets for Federated Survival Analysis Simulation. In: *Proc. Companion of the 2023 ACM/SPEC International Conference on Performance Engineering*. New York: Association for Computing Machinery; 2023. P. 173–180. http://doi.org/10.1145/3578245.3584935

2. Atlam M, Torkey H, El-Fishawy N, Salem H. Coronavirus Disease 2019 (COVID-19): Survival Analysis Using Deep Learning and Cox Regression Model. *Pattern Analysis and Applications*. 2021;24:993–1005. http://doi.org/10.1007/s10044-021-00958-0

3. Govindarajulu US, Malloy EJ, Ganguli B, Spiegelman D, Eisen EA. The Comparison of Alternative Smoothing Methods for Fitting Non-Linear Exposure-Response Relationships with Cox Models in a Simulation Study. *The International Journal of Biostatistics*. 2009;5(1):2. http://doi.org/ 10.2202/1557-4679.1104

4. Miren Hayet-Otero, Fernando García-García, Dae-Jin Lee, Joaquín Martínez-Minaya, Pedro Pablo España Yandiola, Isabel Urrutia Landa, et al. Extracting Relevant Predictive Variables for COVID-19 Severity Prognosis: An Exhaustive Comparison of Feature Selection Techniques. *PLoS One.* 2023;18(4):e0284150. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0284150

5. Berenguer CV, Pereira F, Câmara JS, Pereira JA. Underlying Features of Prostate Cancer — Statistics, Risk Factors, and Emerging Methods for Its Diagnosis. *Current Oncology*. 2023;30(2):2300–2321. https://doi.org/10.3390/curroncol30020178

6. Жаринов, Г.М., Богомолов О.А. Исходное время удвоения простатспецифического антигена: клиническое и прогностическое значение у больных раком предстательной железы. *Онкоурология*. 2014;(1):44–48.

Zharinov GM, Bogomolov OA. The Pretreatment Prostate-Specific Antigen Doubling Time: Clinical and Prognostic Values in Patients with Prostate Cancer. *Cancer Urology*. 2014;(1):44–48.

7. Kneev AY, Shkol'nik MI, Bogomolov OA, Zharinov GM. Prostate Specific Antigen Density as a Prognostic Factor in Patients with Prostate Cancer Treated with Combined Hormonal Radiation Therapy. *Siberian Journal of Oncology*. 2022;21(3):12–23. https://doi.org/10.21294/1814-4861-2022-21-3-12-23

8. Ewees AA, Al-qaness MA Abualigah L, Oliva D, Algamal ZY, Anter AM, et al. Boosting Arithmetic Optimization Algorithm with Genetic Algorithm Operators for Feature Selection: Case Study on Cox Proportional Hazards Model. *Mathematics*. 2021;9(18):2321. https://doi.org/10.3390/math9182321

9. Alabdallah A, Ohlsson M, Pashami S, Rögnvaldsson Th. The Concordance Index Decomposition: A Measure for a Deeper Understanding of Survival Prediction Models. *Artificial Intelligence in Medicine*. 2024;148:102781. https://doi.org/10.48550/ARXIV.2203.00144

10. Cavalcante Th, Ospina R, Leiva V, Cabezas X, Martin-Barreiro C. Weibull Regression and Machine Learning Survival Models: Methodology, Comparison, and Application to Biomedical Data Related to Cardiac Surgery. *Biology*. 2023;12(3):442. https://doi.org/10.3390/biology12030442

11. Guangyu Liu, Yuwei Bai, Ling Zhu, Qingyun Wang, Wei Zhang. A Sequential Excitation and Simplified Ant Colony Optimization Based Global Extreme Seeking Control Method for Performance Improvement. *Swarm and Evolutionary Computation*. 2024;86:101522. https://doi.org/10.1016/j.swevo.2024.101522

12. Blagoveshchenskaya EA, Mikulik II, Strüngmann LH. Ant Colony Optimization with Parameter Update Using a Genetic Algorithm for Travelling Salesman Problem. In: *Proc. Workshop "Models and Methods for Researching Information Systems in Transport"*. 2020;2803:20–25. URL: https://ceur-ws.org/Vol-2803/paper3.pdf (accessed: 17.09.24).

13. Жаринов Г.М. *База данных больных раком предстательной железы*. База данных РФ. № 2016620331. 2016. 1 с. URL: https://www1.fips.ru/fips_servl/fips_servlet?DB=DB&DocNumber=2016620331&TypeFile=html (дата обращения: 17.09.2024).

Zharinov GM. Prostate Cancer Patients Database. RF Database, no. 2016620331. 2016. 1 p. (in Russ.) URL: https://www1.fips.ru/fips_servl/fips_servlet?DB=DB&DocNumber=2016620331&TypeFile=html (accessed: 17.09.2024).

14. Ghannad-Rezaie M, Soltanian-Zadeh H, Hao Ying, Ming Dong. Selection-Fusion Approach for Classification of Datasets with Missing Values. *Pattern Recognition*. 2010;43(6):2340–2350. https://doi.org/10.1016/j.patcog.2009.12.003

15. Troyanskaya O, Cantor M, Sherlock G, Brown P, Hastie T, Tibshirani R, et al. Missing Value Estimation Methods for DNA Microarrays. *Bioinformatics*. 2001;17(6):520–525. https://doi.org/10.1093/bioinformatics/17.6.520

16. Koshechkin AA, Andryushchenko VS, Zamyatin AV. A New Method to Missing Value Imputation for Immunosignature Data. *CTM* (*Sovremennye tehnologii v medicine)*. 2019;11(2):19–24. https://doi.org/10.17691/stm2019.11.2.03

17. Eunseo Oh, Hyunsoo Lee. Quantum Mechanics-Based Missing Value Estimation Framework for Industrial Data. *Expert Systems with Applications*. 2024;236:121385. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.121385

Об авторах:

Илья Игоревич Микулик, аспирант кафедры высшей математики Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (190031, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Московский пр., 9), SPIN-код, ORCID, ScopusID, ResearcherID, mikulik.ilia@gmail.com

Геннадий Михайлович Жаринов, доктор медицинских наук, профессор, главный научный сотрудник отдела лучевых и комбинированных методов лечения РНЦРХТ им. акад. А.М. Гранова Минздрава России (197758, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, пос. Песочный, ул. Ленинградская, 70), SPIN-код, ORCID

Алексей Юрьевич Кнеев, кандидат медицинских наук, старший преподаватель кафедры радиологии, хирургии и онкологии, врач-онколог отделения онкоурологии РНЦРХТ им. акад. А.М. Гранова Минздрава России (197758, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, пос. Песочный, ул. Ленинградская, 70), SPIN-код, ORCID, ScopusID

Заявленный вклад авторов:

И.И. Микулик: разработка и реализация метода исследования — алгоритма муравьев-опылителей.

Г.М. Жаринов: постановка цели исследования, предоставление базы данных для исследования, описание характеристик базы данных, описание прикладной задачи.

А.Ю. Кнеев: описание актуальности и результатов исследования.

Конфликт интересов: **авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Ilya I. Mikulik, Postgraduate student of the Higher Mathematics Department, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (9, Moskovsky Pr., St. Petersburg, 190031, Russian Federation), SPIN-code, ORCID, ScopusID, ResearcherID, mikulik.ilia@gmail.com

Gennadiy M. Zharinov, Dr.Sci.(Medicine), Professor, Chief Researcher of the Department of Radiation and Combined Methods of Treatment, Granov's Russian Research Center for Radiology and Surgical Technologies (70, Leningradskaya Str., v. Pesochny, St. Petersburg, 197758, Russian Federation), SPIN-code, ORCID

Aleksei Yu. Kneev, Cand.Sci.(Medicine), Senior Lecturer of the Department of Radiology, Surgery and Oncology, Oncologist of the Department of Oncourology, Granov's Russian Research Center for Radiology and Surgical Technologies (70, Leningradskaya Str., v. Pesochny, St. Petersburg, 197758, Russian Federation), SPIN-code, ORCID, ScopusID

Claimed Contributorship:

II Mikulik: development and implementation of the research method — the ant pollinator algorithm.

GM Zharinov: setting the research objective, providing a database for research, describing the characteristics of the database, describing the applied task.

AY Kneev: description of the urgency of the study and the research results.

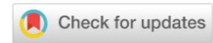
Conflict of Interest Statement: **the authors declare no conflict of interest.**

All authors have read and approved the final manuscript.

Поступила в редакцию / Received 28.10.2024
Поступила после рецензирования / Reviewed 22.11.2024
Принята к публикации / Accepted 02.12.2024

ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ
INFORMATION TECHNOLOGY,
COMPUTER SCIENCE AND MANAGEMENT





УДК 621.372
https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-4-424-432

Оригинальное теоретическое исследование

Оптимизационная задача для вероятностных временны́х интервалов квазидетерминированного выходного и самоподобного входного потока пакетов данных в телекоммуникационных сетях



EDN: MCOGWO

Г.И. Линец ✉, **Р.А. Воронкин**, **Г.В. Слюсарев**, **С.В. Говорова**
Северо-Кавказский федеральный университет, г. Ставрополь, Российская Федерация
✉ kbytw@mail.ru

Аннотация

Введение. При управлении трафиком на уровне пакетов в современных телекоммуникационных сетях связи предлагается задействовать методы, преобразующие самоподобный стохастический поток пакетов в квазидетерминированный. Для этого нужно применить сложные вероятностные законы распределения самоподобных потоков. Из литературы известны методы балансировки сетевой нагрузки, которые при обозначенной выше проблеме способствуют повышению эффективности телекоммуникационных систем связи. Однако нет строго математического решения, позволяющего узнать оптимальные вероятностные характеристики выходного потока, ориентируясь на входной. Представленная научная работа призвана восполнить этот пробел. Ее цель — создать метод определения оптимальных вероятностных характеристик потока пакетов, используя минимальное значение меры близости самоподобного входного и квазидетерминированного выходного потоков.

Материалы и методы. Для решения задачи исследования параметры распределения выходного потока выбирались так, чтобы функция аппроксимации была близка к δ-функции. В качестве меры близости входных и выходных распределений временны́х интервалов использовали дивергенцию Кульбака – Лейблера. Задействовали методы теорий множеств, метрических пространств, многомерной оптимизации и телетрафика. В алгоритм решения включили минимизацию дивергенции Кульбака – Лейблера и предельный переход к δ-функции.

Результаты исследования. Показано вероятностное распределение — приближение δ-функции, обеспечивающей равенство временны́х интервалов квазидетерменированного выходного потока пакетов. Представлен метод преобразования самоподобного входного потока в квазидетерминированный выходной. В качестве меры их близости использовали дивергенцию Кульбака – Лейблера. Минимум дивергенции Кульбака – Лейблера между входным и выходным потоками с нормальным распределением достигается в случае равенства математических ожиданий этих потоков. С помощью предельного перехода установлено, что интервал времени T между пакетами квазидетерминированного выходного потока должен быть равен математическому ожиданию интервалов времени между пакетами входного самоподобного потока. С целью получения квазидетерминированного потока выполняется предельный переход для найденного значения математического ожидания при $\sigma \to 0$.

Обсуждение и заключение. Применение данного метода уменьшит негативное влияние самоподобия сетевого трафика на эффективность телекоммуникационной сети. Использование квазидетерминированных потоков дает возможность прогнозировать нагрузку сетевых ресурсов, что может быть базой для повышения качества обслуживания пользователей. Устраняются две сложности, связанные с расчетами и практической реализацией решения. Во-первых, затруднительно использовать дельта-функцию в качестве функции плотности распределения выходного потока. Во-вторых, при эксплуатации телекоммуникационных сетей не бывает идеальных детерминированных потоков. Предложенный метод обладает большим потенциалом при проектировании и оптимизации сетей связи.

Ключевые слова: самоподобный поток пакетов, квазидетерминированный поток пакетов, временны́е интервалы поступления пакетов, дивергенция Кульбака – Лейблера

Благодарности. Авторы выражают благодарность редакции и рецензентам за внимательное отношение к статье и замечания, которые позволили повысить ее качество.

Для цитирования. Линец Г.И., Воронкин Р.А., Слюсарев Г.В., Говорова С.В. Оптимизационная задача для вероятностных временны́х интервалов квазидетерминированного выходного и самоподобного входного потока пакетов данных в телекоммуникационных сетях. *Advanced Engineering Research* (*Rostov-on-Don*). 2024;24(4):424–432. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-4-424-432

Original Theoretical Research

Optimization Problem for Probabilistic Time Intervals of Quasi-Deterministic Output and Self-Similar Input Data Packet Flow in Telecommunication Networks

Gennadii I. Linets ✉, **Roman A. Voronkin**, **Gennadii V. Slyusarev**, **Svetlana V. Govorova**
North-Caucasus Federal University, Stavropol, Russian Federation
✉ kbytw@mail.ru

Abstract
Introduction. When managing traffic at the packet level in modern telecommunication networks, it is proposed to use methods that transform a self-similar stochastic packet flow into a quasi-deterministic one. To do this, it is required to apply complex probabilistic laws of distribution of self-similar flows. From the literature, methods of balancing the network load are known, which, with the problem indicated above, contribute to increasing the efficiency of telecommunication systems. However, there is no strictly mathematical solution to find out the optimal probabilistic characteristics of the output flow, based on the input flow. The presented research is intended to fill this gap. Its objective is to create a method for determining the optimal probabilistic characteristics of the packet flow, using the minimum value of the proximity measure of the self-similar input and quasi-deterministic output flows.
Materials and Methods. To solve the research problem, the parameters of the output flow distribution were selected so that the approximation function was close to δ-function. The Kullback-Leibler divergence was used as a proximity measure of the input and output distributions of time intervals. Methods of set theory, metric spaces, multidimensional optimization, and teletraffic were used. The solution algorithm included minimization of the Kullback-Leibler divergence and the limit passage to δ-function.
Results. A probability distribution is shown — an approximation of δ-function, which maintains the equality of time intervals of a quasi-deterministic output packet flow. A method for transforming a self-similar input flow into a quasi-deterministic output flow is presented. The Kullback–Leibler divergence was used as a measure of their proximity. The minimum of the Kullback-Leibler divergence between the input and output flows with a normal distribution was achieved in the case of equality of the mathematical expectations of these flows. Using the passage to the limit, it has been established that time interval T between packets of the quasi-deterministic output flow must be equal to the mathematical expectation of the time intervals between packets of the input self-similar flow. To obtain a quasi-deterministic flow, the passage to the limit is performed for the found value of the mathematical expectation at $\sigma \to 0$.
Discussion and Conclusion. The application of this method will reduce the negative impact of self-similarity of network traffic on the efficiency of the telecommunication network. The use of quasi-deterministic flows makes it possible to predict the load of network resources, which can be the basis for improving the quality of user service. Two difficulties associated with calculations and practical implementation of the solution are eliminated. Firstly, it is difficult to use the delta function as a function of the output flow distribution density. Secondly, there are no ideal deterministic flows in the operation of telecommunication networks. The proposed method has great potential in the design and optimization of communication networks.

Keywords: self-similar packet flow, quasi-deterministic packet flow, packet arrival time intervals, Kullback-Leibler divergence

Acknowledgements. The authors would like to thank the Editorial board and the reviewers for their attentive attitude to the article and for the specified comments that improved the quality of the article.

For Citation. Linets GI, Voronkin RA, Slyusarev GV, Govorova SV. Optimization Problem for Probabilistic Time Intervals of Quasi-Deterministic Output and Self-Similar Input Data Packet Flow in Telecommunication Networks. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2024;24(4):424–432. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-4-424-432

Введение. Телекоммуникационные сети работают в условиях увеличивающихся нагрузок и роста трафика, который подчиняется сложным вероятностным законам распределения и не поддается точному прогнозированию. Самоподобие потока пакетов создает устойчивые зависимости, что ограничивает объем информационного обмена пользователей [1]. В [2] предложены методы, обеспечивающие удовлетворение требований к качеству обслуживания (англ. quality of service, QoS) передачи и приема информации. Авторы указанной работы полагают, что необходимо фокусироваться на приоритетном трафике сетей нового поколения, однако их решение не устраняет проблему самоподобия потоков пакетов. Милан Г. предложил модель управления сетевыми потоками с учетом пропускной способности каналов, не принимая во внимание фрактальные характеристики трафика [3]. В [4] разработаны методы балансировки нагрузки с учетом мультифрактальных свойств трафика, однако они не решают проблемы самоподобия и структурной оптимизации выходных потоков. Ушанев К.В. и Макаренко С.И. [5], проанализировав методы повышения устойчивости сетей с учетом сложных характеристик трафика, предложили модели трансформации самоподобных входных потоков [6]. В данном случае строгий математический анализ позволил бы минимизировать отличия между распределениями входных и выходных потоков и, следовательно, устранить самоподобие. Однако в [6] такое решение отсутствует.

Качественная регулярная передача данных предполагает использование модели источника трафика с постоянной скоростью (постоянный битрейт, англ. constant bitrate, CBR) [4]. В этой модели узел передает пакеты фиксированного размера через равные интервалы времени T. Если время между отправкой пакетов значительно больше времени передачи одного пакета, то размер пакета может быть несущественным. Как отмечается в [4], в условиях ограниченной пропускной способности данную модель можно использовать для обеспечения стационарности трафика и минимизации задержек. В [7] показаны преимущества CBR для сетей с жесткими требованиями к временны́м характеристикам передачи, а в [8] подчеркивается ее эффективность в условиях высокой плотности сенсоров. Согласно [9], предсказуемость трафика в указанной модели делает ее более результативной с точки зрения экономии энергии, что критично для энергетически ограниченных устройств.

Как показано в [10], модель CBR традиционно ассоциируется с беспроводными сенсорными сетями, однако она также может быть полезной в сетях общего назначения [11]. Ее целесообразно использовать при решении задач балансировки нагрузки в телекоммуникационных системах [12].

Таким образом, для обеспечения предсказуемости и стабильности работы сети важно учитывать квазидетерминированные потоки пакетов. Их нужно интегрировать в приложения с высокими требованиями к качеству обслуживания и производительности [13].

Исследователи неоднократно обращались к задаче ограничения воздействия фрактальных характеристик сетевой нагрузки [14]. Известно, например, что можно управлять трафиком на уровне пакетов. Это уменьшает число повторных передач пакетов и структурных сходств между ними [15].

Отдельно стоит указать на необходимость определения оптимальных временны́х интервалов между загрузками пакетов. Это имеет особое значение для управления трафиком и предполагает преобразование самоподобного стохастического потока пакетов в квазидетерминированный.

Описанный в [16] подход обеспечивает преобразование входного потока пакетов с гамма-распределением в квазидетерминированный выходной поток, основанный на решении системы уравнений Линдли. Однако в [16] не приводятся рекомендации по снижению влияния долговременных зависимостей на QoS для других самоподобных распределений.

Целью представленной научной работы является создание метода получения оптимальных вероятностных характеристик выходного потока пакетов. Решение базируется на использовании минимального значения меры близости двух потоков: самоподобного входного и квазидетерминированного выходного.

Материалы и методы. Параметры распределения выходного потока выбрали таким образом, чтобы функция аппроксимации была близка к δ-функции (функция Дирака, она же — функция распределения квазидетерминированного выходного потока). Мера близости входных и выходных распределений временны́х интервалов потоков пакетов — дивергенция (расхождение) Кульбака – Лейблера. Использовались методы теорий множеств, метрических пространств, многомерной оптимизации и телетрафика. В алгоритм решения задачи включили предельный переход к δ-функции, позволяющий восстановить квазидетерминированный поток, а также минимизацию расхождения Кульбака – Лейблера. Для этого нашли частные производные и приравняли их к нулю.

Будем считать, что известны характеристики вероятностного распределения интервалов между пакетами входного трафика $f(\tau; \theta_1, \theta_2, \ldots, \theta_n)$. Здесь $\theta_1, \theta_2, \ldots, \theta_n$ — параметры распределения, τ — временное расстояние между пакетами. Показатель Хёрста $0{,}5 < H < 1$, $\theta_1(H)$ [17], $g(\tau; \eta_1, \eta_2, \ldots, \eta_n)$ — вероятностное распределение значений интервалов между пакетами в выходном потоке без самоподобия с параметрами $\eta_1, \eta_2, \ldots, \eta_n$.

Условия использования преметрики известны из [17]:

1) $\rho(f, g) \geq 0$,

2) $\rho(f, g) \geq 0 \leftrightarrow f \equiv g$.

Необходимо определить

1. Вероятностное распределение $g(\tau;\ \eta_1, \eta_2, \ldots, \eta_m)$ на основе его приближения к δ-функции (функции Дирака), обеспечивающей равенство временны́х интервалов квазидетерменированного выходного потока пакетов.

2. Метод, обеспечивающий получение оптимальных вероятностных характеристик выходного потока пакетов.

Решение будет базироваться на минимальном значении меры близости самоподобного входного и квазидетерминированного выходного потоков.

Учтем три ограничения

1. Минимальное значение преметрики $\rho(f, g) \rightarrow min$.
2. Функции $f(\tau;\ \theta_1, \theta_2, \ldots, \theta_n)$ и $g(\tau;\ \eta_1, \eta_2, \ldots, \eta_m)$ — кусочно-непрерывные.
3. Функция $\rho(f, g)$ — дифференцируемая по переменным $\eta_1, \eta_2, \ldots, \eta_m$ во всей области определения:

$$\forall \eta_{\mathrm{j}} \left| \frac{\partial \rho(f, g)}{\partial \eta_{\mathrm{j}}} \right| < \infty, \text{ где: } j = 1, 2, \ldots, m.$$

Результаты исследования. Будем считать, что вероятностное распределение квазидетерменированного выходного потока описывается функцией Дирака [18]:

$$g(\tau;\ \eta_1, \eta_2, \ldots, \eta_m) = \delta(\tau - T).$$

Есть две причины, по которым эту же функцию (или δ-функцию) используем в качестве функции распределения вероятности.

1. Она принимает неотрицательные значения:

$$\delta(\tau - T) \geq 0.$$

2. Интеграл по всей числовой оси определяется выражением:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \delta(\tau - T)\, d\tau = 0.$$

Отметим, что при вычислении значения преметрики $\rho(f, g)$ затруднительно использовать дельта-функцию в качестве функции плотности распределения выходного потока. Кроме того, идеальных детерминированных потоков не бывает в условиях эксплуатации телекоммуникационных сетей. Значит, имеет смысл задействовать вместо детерминированного потока квазидетерминированный. В этом случае при изменении одного параметра функции плотности распределения она будет стремиться в пределе к дельта-функции Дирака.

Рассмотрим равномерное распределение с математическим ожиданием, равным T, и интервалом значений, равным ΔT. Функция плотности распределения в этом случае будет иметь вид:

$$\rho(\tau) = \begin{cases} \dfrac{1}{\Delta T}, \text{ если } T - \dfrac{\Delta T}{2} \leq \tau \leq T + \dfrac{\Delta T}{2} \\ 0, \text{ в противном случае} \end{cases}.$$

При $\Delta T \rightarrow 0$ плотность распределения такого потока $\rho(\tau) \rightarrow \delta(\tau - T)$.

На практике из-за джиттера невозможно обеспечить равномерные интервалы между пакетами. Чаще всего математические модели телекоммуникационных процессов строятся в предположении, что величина джиттера подчиняется нормальному закону распределения [19]. Для детерминированного потока пакетов временные интервалы между ними распределяются нормально с математическим ожиданием $\mu = T$ и стандартным отклонением, которое должно удовлетворять правилу трех сигм [20]: $0 < 3\sigma \leq J_0$, где J_0 — нормативное значение джиттера.

В [18] установлено, что обусловленный джиттером квазидетерминированный поток с нормальным распределением слабо сходится к $\delta(\tau - T)$ при $\delta \rightarrow 0$.

Это значит, что наилучшая аппроксимация детерминированного потока — это квазидетерминированный поток пакетов с нормальным распределением. Его математическое ожидание совпадает с постоянным временны́м интервалом между пакетами $\mu = T$ и среднеквадратическим отклонением σ, ограниченным уровнем джиттера J_0:

$$g(\tau;\ \eta_1, \eta_2, \ldots, \eta_m) = g(\tau, \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\tau - \mu}{\sigma}\right)^2}.$$

Для достижения цели исследований в качестве преметрики [17] используем дивергенцию Кульбака – Лейблера $D_{KL}(f \| g)$. Учитывая ее свойства и принятые допущения, сформулируем лемму.

Лемма. Пусть $f(\tau;\ \theta_1, \theta_2, \ldots, \theta_n)$ — кусочно-непрерывная функция:

$$f(\tau;\ \theta_1, \theta_2, \ldots, \theta_n) = \begin{cases} \varphi(\tau;\ \theta_1, \theta_2, \ldots, \theta_n), \tau \geq t, \\ 0, \tau < t. \end{cases} \quad (1)$$

Здесь $t \geq 0$ — некоторая пороговая величина, а $\varphi(\tau;\ \theta_1, \theta_2, \ldots, \theta_n) > 0$ — непрерывная функция на интервале $(t, +\infty)$.

Выходной поток $g(\tau;\,\mu,\,\sigma)$ подчиняется нормальному распределению интервалов времени между пакетами без самоподобия с параметрами μ и $\sigma > 0$.

Требуется доказать, что $D_{KL}(f\,||\,g)$ достигает минимума при равенстве математических ожиданий f и g.

Доказательство. Воспользуемся подходом, изложенным в [17].

Перекрестная энтропия $H(f,\,g)$ может быть определена двумя способами. Первый:

$$H(f) = -\int_{-\infty}^{+\infty} f(\tau;\theta_1,\theta_2,\ldots,\theta_n)\; ln\left[f(\tau;\theta_1,\theta_2,\ldots,\theta_n)\right]d\tau =$$
$$=-\int_{max\{t,0\}}^{+\infty} f(\tau;\theta_1,\theta_2,\ldots,\theta_n)\,ln\left[\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\tau-\mu}{\sigma}\right)^2}\right]d\tau. \qquad (2)$$

Второй:

$$H(f,g) = -\int_{t}^{+\infty} \varphi(\tau;\theta_1,\theta_2,\ldots,\theta_n)\left[ln\left(\sigma\sqrt{2\pi}\right)-\frac{1}{2}\left(\frac{\tau-\mu}{\sigma}\right)^2\right]d\tau =$$
$$= ln\left(\sigma\sqrt{2\pi}\right)\int_{t}^{+\infty}\varphi(\tau;\theta_1,\theta_2,\ldots,\theta_n)\,d\tau + \frac{1}{2\sigma^2}\int_{t}^{+\infty}(\tau-\mu)^2\,\varphi(\tau;\theta_1,\theta_2,\ldots,\theta_n)\,d\tau \qquad (3)$$

Для функции плотности распределения входного потока пакетов:

$$\int_{t}^{+\infty}\phi\varphi(\tau;\,\theta_1,\theta_2,\ldots,\theta_n)\,d\tau = 1.$$

Следовательно:

$$H(f,g) = ln\left(\sigma\sqrt{2\pi}\right)+\frac{1}{2\sigma^2}\int_{t}^{+\infty}(\tau-\mu)^2\,\phi(\tau;\theta_1,\theta_2,\ldots,\theta_n)\,d\tau =$$
$$= ln\left(\sigma\sqrt{2\pi}\right)+\frac{1}{2\sigma^2}\int_{t}^{+\infty}\left(\tau^2-2\tau\mu+\mu^2\right)\phi(\tau;\theta_1,\theta_2,\ldots,\theta_n)\,d\tau =$$
$$= ln\left(\sigma\sqrt{2\pi}\right)+\frac{1}{2\sigma^2}\int_{t}^{+\infty}\left(\tau^2-2\tau\mu\right)\varphi(\tau;\theta_1,\theta_2,\ldots,\theta_n)\,d\tau+\frac{\mu^2}{2\sigma^2}\int_{t}^{+\infty}\varphi(\tau;\theta_1,\theta_2,\ldots,\theta_n)\,d\tau = \qquad (4)$$
$$= ln\left(\sigma\sqrt{2\pi}\right)+\frac{\mu^2}{2\sigma^2}+\frac{1}{2\sigma^2}\int_{t}^{+\infty}\tau^2\varphi(\tau;\theta_1,\theta_2,\ldots,\theta_n)\,d\tau-\frac{\mu^2}{\sigma^2}\int_{t}^{+\infty}\tau\varphi(\tau;\theta_1,\theta_2,\ldots,\theta_n)\,d\tau.$$

Известно также:

$$\int_{t}^{+\infty}\tau\varphi(\tau;\theta_1,\theta_2,\ldots,\theta_n)\,d\tau = E(\theta_1,\theta_2,\ldots,\theta_n),$$
$$\int_{t}^{+\infty}\tau^2\varphi(\tau;\theta_1,\theta_2,\ldots,\theta_n)\,d\tau = \nu_2(\theta_1,\theta_2,\ldots,\theta_n),$$

где E — функция, позволяющая определить математическое ожидание входного самоподобного потока пакетов.

Таким образом,

$$H(f,g) = ln\left(\sigma\sqrt{2\pi}\right)+\frac{\mu^2}{2\sigma^2}+\frac{1}{2\sigma^2}\nu_2(\theta_1,\theta_2,\ldots,\theta_n)-\frac{\mu}{\sigma^2}E(\theta_1,\theta_2,\ldots,\theta_n). \qquad (5)$$

Тогда:

$$D_{KL}(f\,||\,g) = H(f,g)-H(f) =$$
$$= ln\left(\sigma\sqrt{2\pi}\right)+\frac{\mu^2}{2\sigma^2}+\frac{1}{2\sigma^2}\nu_2(\theta_1,\theta_2,\ldots,\theta_n)-\frac{\mu}{\sigma^2}E(\theta_1,\theta_2,\ldots,\theta_n)-H(\theta_1,\theta_2,\ldots,\theta_n). \qquad (6)$$

Решим задачу многомерной оптимизации:

$$\frac{\partial D_{KL}(f\,||\,g)}{\partial\mu} = \frac{\mu}{\sigma^2}-\frac{1}{\sigma^2}E(\theta_1,\theta_2,\ldots,\theta_n). \qquad (7)$$

Значит:

$$\mu = E(\theta_1, \theta_2, \ldots, \theta_n).$$

Для нормального распределения

$$E(g) = \mu,$$

следовательно,

$$E(g) = E(\theta_1, \theta_2, \ldots, \theta_n),$$

$$E(f) = E(g).$$

Воспользуемся критерием Сильвестра:

$$\frac{\partial^2 D_{KL}(f \,||\, g)}{\partial \mu^2} = \frac{1}{\sigma^2}. \quad (8)$$

Необходимое и достаточное условие минимума $D_{KL}(f \,\|\, g)$ — равенство математических ожиданий входного и выходного потоков пакетов.

Для детерминированного потока временной интервал T между пакетами можно определить по предельному переходу при $\sigma \to 0$, то есть:

$$T = \lim_{\sigma \to 0} E(\theta_1, \theta_2, \ldots, \theta_n) = E(\theta_1, \theta_2, \ldots, \theta_n). \quad (9)$$

Последнее равенство возможно, поскольку выражение $E(\theta_1, \theta_2, \ldots, \theta_n)$ не содержит в явном виде σ. Следовательно, в рамках данного метода для квазидетерминированного выходного потока временной интервал между пакетами равен математическому ожиданию временных интервалов самоподобного стохастического потока.

Ниже приводится последовательность реализации разработанного метода.

1. В качестве закона распределения интервалов времени между пакетами выходного потока следует использовать нормальный закон со среднеквадратическим отклонением, ограниченным величиной джиттера J_0.

2. Необходимо найти математическое ожидание входного самоподобного потока пакетов $E(\theta_1, \theta_2, \ldots, \theta_n)$ и определить величину математического ожидания μ выходного потока, имеющего нормальное распределение. Для этого используется утверждение ранее доказанной леммы.

3. Для найденного значения μ определяется величина интервала времени $\mu = T$ квазидетерминированного выходного потока пакетов.

В качестве примера рассмотрим самоподобный поток с распределением Парето:

$$f(\tau; \alpha; \tau_m) = \begin{cases} \dfrac{\alpha \tau_m^{\alpha}}{\tau^{\alpha+1}}, \tau \geq \tau_m \\ 0, \tau < \tau_m. \end{cases} \quad (10)$$

Требуется определить величину $\mu = \psi(\alpha, \tau_m)$, которая минимизирует $D_{KL}(f \,\|\, g)$.

Для распределения Парето:

$$H(f(\tau)) = -\int_{\tau_m}^{\infty} \tau^{-b-2} \tau_m^{b+1} (b+1) \log\left(\tau^{-b-2} \tau_m^{b+1} (b+1)\right) d\tau. \quad (11)$$

Перекрестная энтропия исследуемых законов равна:

$$M(f(\tau), g(\tau)) = -\int_{\tau_m}^{\infty} \alpha \tau^{-\alpha-1} \tau_m^{\alpha} \ln\left(\frac{e^{-\frac{(\mu-\tau)^2}{2\sigma^2}}}{\sqrt{2\pi\sigma}}\right) d\tau. \quad (12)$$

Будем рассуждать так же, как при доказательстве леммы. Получим:

$$\mu = \frac{\alpha \tau_m}{\alpha - 1}. \quad (13)$$

Это выражение соответствует математическому ожиданию распределения Парето.

Найдем вторую производную, и тогда значение μ минимизирует значение $D_{KL}(f \,\|\, g)$.

Для получения квазидетерминированного потока выполним предельный переход для найденного значения математического ожидания при $\sigma \to 0$:

$$T = \lim_{\sigma \to 0} \mu = \lim_{\sigma \to 0} \frac{\alpha \tau_m}{\alpha - 1} = \frac{\alpha \tau_m}{\alpha - 1}. \quad (14)$$

Таким образом, при преобразовании самоподобного входного потока пакетов в квазидетерминированный выходной значение временных интервалов квазидетерминированного потока T совпадает с математическим ожиданием входного потока [21].

Обсуждение и заключение. Проведенное научное исследование открывает новые возможности для обеспечения телекоммуникации в условиях ограниченных сетевых ресурсов. Авторы задействовали математические методы и получили оптимальные вероятностные характеристики выходного потока пакетов, используя минимальное значение меры близости самоподобного входного и квазидетерминированного выходного потоков. Согласно лемме, которая доказана в рамках данной работы, при нормальном распределении для выходного потока минимальное значение дивергенции Кульбака – Лейблера достигается, если равны математические ожидания входного и выходного потоков. Решение задачи многомерной оптимизации доказало адекватность предложенного метода. Следует учитывать его возможности при работе с телекоммуникационными сетями. Использование данного подхода способно ограничить негативное воздействие самоподобия потока и таким образом улучшить качество обслуживания пользователей при сохранении объема информационного обмена.

В перспективе авторы планируют разработать методы снижения самоподобия сетевого трафика. Такой подход, предположительно, будет базироваться на дивергенции Йенсена – Шеннона. Эта мера близости отличается от распределения Кульбака – Лейблера тем, что является полной метрикой и ограничена сверху [22].

Список литературы / References

1. Хаусдорф Ф. *Теория множеств.* Москва: Ленанд; 2023. 304 с.

Hausdorff F. *Set Theory*. Moscow: Lenand; 2023. 304 p. (In Russ.)

2. Karmeshu Shachi Sharma. *Long Tail Behavior of Queue Lengths in Broadband Networks: Tsallis Entropy Framework.* URL: https://arxiv.org/abs/1012.2464 (accessed: 16.09.2024).

3. Millán G, Lefranc G. *A Simplified Multifractal Model for Self-Similar Traffic Flows in High-Speed Computer Networks Revisited*. URL: https://arxiv.org/abs/2103.05183 (accessed: 16.09.2024).

4. Астахова Т.Н., Верзун Н.А., Касаткин В.В., Колбанев М.О., Шамин А.А. Исследование моделей связности сенсорных сетей. *Информационно-управляющие системы*. 2019;(5):38–50. https://doi.org/10.31799/1684-8853-2019-5-38-50.

Astakhova T, Verzun N, Kasatkin V, Kolbanev M, Shamin AA. Sensor Network Connectivity Models. *Information and Control Systems*. 2019;(5):38–50. https://doi.org/10.31799/1684-8853-2019-5-38-50

5. Ушанев К.В., Макаренко С.И. Аналитико-имитационная модель функционального преобразования трафика сложной структуры. *Системы управления, связи и безопасности*. 2015;(2):26–44.

Ushanev KV, Makarenko SI. Analytical-Simulation Model of Functional Conversion of Complex Traffic. *Systems of Control, Communication and Security*. 2015;(2):26–44.

6. Ушанев К.В., Макаренко С.И. Преобразование структуры трафика с учетом требований по качеству его обслуживания. *Радиотехнические и телекоммуникационные системы*. 2015;(2):74–84.

Ushanev KV, Makarenko SI. Traffic Structure Conversion with Requirements for the Traffic Service Quality. *Radio Engineering and Telecommunications Systems*. 2015;(2):74-84.

7. Tchuitcheu WC, Bobda C, Pantho MJ. H. Internet of Smart-Cameras for Traffic Lights Optimization in Smart Cities. *Internet of Things*. 2020:11;100207. https://doi.org/10.1016/j.iot.2020.100207

8. Dutta H, Bhuyan AK, Biswas S. *Reinforcement Learning for Protocol Synthesis in Resource-Constrained Wireless Sensor and IoT Networks*. URL: https://arxiv.org/abs/2302.05300 (accessed: 16.09.2024).

9. Pasandi HB, Haqiqat A, Moradbeikie A, Keshavarz A, Rostami H, Paiva S, et al. Low-Cost Traffic Sensing System Based on LoRaWAN for Urban Areas. In: *Proc. 1st International Workshop on Emerging Topics in Wireless.* New York, NY: Association for Computing Machinery; 2022. P. 6–11. URL: https://dl.acm.org/doi/10.1145/3565474.3569069 (accessed: 16.09.2024).

10. Qiong Liu, Chehao Wang, Ce Zheng. *Distributed Decisions on Optimal Load Balancing in Loss Networks.* URL: https://arxiv.org/abs/2307.04506 (accessed: 16.09.2024).

11. Shenoy N. A Deterministic Quantised Rate Based Flow Control Scheme for ABR Type Traffic in ATM Networks. In: *Proc. Second IEEE Symposium on Computer and Communications*. New York City: IEEE; 1997. P. 73-79. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/615974 (accessed: 16.09.2024).

12. Müller-Clostermann B. Employing Deterministic and Stochastic Petri Nets for the Analysis of Usage Parameter Control in ATM-Networks. In: *Workshop on High Performance Computing and Gigabit Local Area Networks*. Springer: Berlin, Heidelberg; 2006. P. 101–121. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/3540761691_8 (accessed: 16.09.2024).

13. Daryalal M, Bodur M. Stochastic RWA and Lightpath Rerouting in WDM Networks. *Informs Journal on Computing*. 2022;34(5):2383–2865. https://doi.org/10.1287/ijoc.2022.1179

14. Шелухин О.И., Тенякшев А.М., Осин А.В. *Фрактальные процессы в телекоммуникациях*. Москва: Радиотехника; 2003. 479 с.

Shelukhin OI, Tenyakshev AM, Osin AV. *Fractal Processes in Telecommunications*. Moscow: Radiotekhnika; 2003. 479 p. (In Russ.)

15. Millán G, Lefranc G, Osorio-Comparán R. *The Associative Multifractal Process: A Novel Model for Computer Network Traffic Flows*. URL: https://arxiv.org/abs/2106.14666 (accessed: 16.09.2024).

16. Карташевский И.В. *Обработка коррелированного трафика в сетях инфокоммуникаций*. Москва: Горячая линия — Телеком; 2023. 200 с.

Kartashevsky IV. *Processing of Correlated Traffic in Infocommunication Networks.* Moscow: Goryachaya liniya — Telekom; 2023. 200 p. (In Russ.)

17. Линец Г.И., Воронкин Р.А., Говорова С.В. Функциональное преобразование самоподобного трафика сетей связи на основе многомерной меры близости вероятностных параметров входного и выходного потоков. *Системы управления, связи и безопасности*. 2022;(4):38–63.

Linets GI, Voronkin RA, Govorova SV. Functional Transformation of the Self-Similar Network Teletraffic Based on the Multidimensional Measure of Similarity between Probability Parameters of Input and Output Packet Flows. *Systems of Control, Communication and Security.* 2022;(4):38–63.

18. Chakraborty S. Some Applications of Dirac’s Delta Function in Statistics for More Than One Random Variable. *Applications and Applied Mathematics*. 2008;3(1):42–54.

19. Blagov A. Modeling a Jitter in Telecommunication Data Networks for Studying Adequacy of Traffic Patterns. *Modern Applied Science*. 2015;9(4):254–263. https://pdfs.semanticscholar.org/7ef0/611d69fb4fcfd467b7d909b74de8eab47f55.pdf

20. Слюсар В.И., Бондаренко М.В. Методы оценивания джиттера АЦП в некогерентных системах. *Известия высших учебных заведений Радиоэлектроника*. 2011;54(10):19–28.

Slyusar VI, Bondarenko M. Methods for Estimating the ADC Jitter in Noncoherent Systems. *Journal of the Russian Universities. Radioelectronics.* 2011;54(10):19–28.

21. Линец Г.И. *Методы структурно-параметрического синтеза, идентификации и управления транспортными телекоммуникационными сетями для достижения максимальной производительности*. Ставрополь: Фабула; 2014. 384 с.

Linets GI. *Methods of Structural-Parametric Synthesis, Identification and Management of Transport Telecommunication Networks to Achieve Maximum Performance*. Stavropol: Fabula; 2014. 384 p. (In Russ.)

22. Nielsen F. On the Jensen–Shannon Symmetrization of Distances Relying on Abstract Means. *Entropy*. 2019;21(5):485.

Об авторах:

Геннадий Иванович Линец, доктор технических наук, профессор, профессор департамента цифровых, робототехнических систем и электроники, Институт перспективной инженерии, СКФУ (355000, Российская Федерация, г. Ставрополь, пр. Кулакова, 2, корп. 9), SPIN-код, ORCID, ScopusID, kbytw@mail.ru

Роман Александрович Воронкин, кандидат технических наук, доцент, доцент департамента цифровых, робототехнических систем и электроники, института перспективной инженерии, СКФУ (355000, Российская Федерация, г. Ставрополь, пр. Кулакова, 2, корп. 9), SPIN-код, ORCID, ScopusID, roman.voronkin@gmail.com

Геннадий Васильевич Слюсарев, доктор технических наук, профессор, профессор департамента строительной инженерии и прототипирования института перспективной инженерии, СКФУ (355000, Российская Федерация, г. Ставрополь, пр. Кулакова, 2, корп. 9), SPIN-код, ORCID, gsliusarev@ncfu.ru

Светлана Владимировна Говорова, старший преподаватель департамента цифровых, робототехнических систем и электроники института перспективной инженерии, СКФУ (355000, Российская Федерация, г. Ставрополь, пр. Кулакова, 2, корп. 9), SPIN-код, ORCID, ScopusID, mitnik2@yandex.ru

Заявленный вклад авторов:

Г.И. Линец: разработка концепции, научное руководство.

Р.А. Воронкин: формальный анализ, проведение исследования, написание, рецензирование и редактирование текста.

Г.В. Слюсарев: валидация результатов.

С.В. Говорова: написание черновика рукописи.

Конфликт интересов. **Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Gennady I. Linets, Dr.Sci. (Eng.), Professor of the Digital, Robotic Systems and Electronics Department, Institute of Engineering, North-Caucasus Federal University (2, Kulakova Ave., Stavropol, 355000, Russian Federation), SPIN-code, ORCID, ScopusID, kbytw@mail.ru

Roman A. Voronkin, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Digital, Robotic Systems and Electronics, Institute of Engineering, North-Caucasus Federal University (2, Kulakova Ave., Stavropol, 355000, Russian Federation), SPIN-code, ORCID, ScopusID, roman.voronkin@gmail.com

Gennadii V. Slyusarev, Dr. Sci (Eng.), Professor of the Civil Engineering and Prototyping Department, Institute of Engineering, North-Caucasus Federal University (2, Kulakova Ave., Stavropol, 355000, Russian Federation), SPIN-code, ORCID, gsliusarev@ncfu.ru

Svetlana V. Govorova, Senior Lecturer of the Department of Digital, Robotic Systems and Electronics, Institute of Engineering, North-Caucasus Federal University (2, Kulakova Ave., Stavropol, 355000, Russian Federation), SPIN-code, ORCID, ScopusID, mitnik2@yandex.ru

Claimed contributorship:
GI Linets: conceptualization, supervision.
RA Voronkin: formal analysis, investigation, writing – review and editing.
GV Slyusarev: validation.
SV Govorova: writing – original draft preparation.

Conflict of Interest Statement: **the authors declare no conflict of interest.**

All the authors have read and approved the final version of the manuscript.

Поступила в редакцию / Received 20.09.2024
Поступила после рецензирования / Reviewed 16.10.2024
Принята к публикации / Accepted 24.10.2024